

EDUCACIÓN Y RETOS SOCIALES DE LOS AVANCES DE LA CIENCIA

Mauricio Fortes*

Introducción

Al siglo XX se le ha denominado "El siglo de la ciencia" porque nunca antes en la historia se había dado un avance intelectual tan extraordinario y creativo como el que hemos atestiguado durante los últimos 100 años. Son varias las revoluciones científicas que caracterizaron al siglo pasado y cada una de ellas tuvo efectos extraordinarios en la vida de nuestros padres y de nosotros mismos. Cuando utilizamos el término "revolucionario" no sólo nos referimos al cambio radical que las nuevas ideas produjeron en el ambiente científico. Hablamos de auténticas revoluciones en el sentido de que también causaron profundas transformaciones estructurales en las relaciones sociales, culturales y económicas en todos los países.

La característica más sobresaliente de la época actual es la intensidad en la producción de conocimiento nuevo y la rapidez con la que este conocimiento se adapta a nuevos procesos tecnológicos o productos en el mercado. Ilustramos este fenómeno con un ejemplo: la mecánica cuántica es una teoría compleja e inescrutable de la física teórica, pero se estima que alrededor de 35% de la riqueza mundial la generan dispositivos que funcionan con base en algún efecto cuántico.

En el presente artículo haremos una revisión de lo que sucedió, en materia de las ciencias, durante el siglo XX, porque estos acontecimientos están dictando la evolución del conocimiento y del progreso en general durante los próximos

lustros. Las transformaciones y los cambios inducidos por estos avances afectan directamente a la sociedad, ya sea por la entrada a la "Era del conocimiento" o por los efectos de la introducción de organismos transgénicos en el ambiente. Por ello, sostenemos que la participación social es fundamental. La sociedad debe estar informada de las implicaciones que tienen las nuevas teorías científicas, a fin de que pueda reaccionar para diseñar, ella misma, la construcción de valores y normas éticas para la época actual. El proceso de "alfabetización científica" en el conjunto de la sociedad resulta ser un imperativo si verdaderamente deseamos que el cambio conduzca a una evolución social satisfactoria y con equidad.

La mecánica cuántica

En diciembre de 1900, Max Planck publicó un artículo que vendría a revolucionar buena parte del conocimiento científico que se había acumulado hasta esa época. En realidad, Planck no buscaba lograr un descubrimiento revolucionario sino simplemente trató de formular un modelo para explicar lo que se conocía como el "problema de la radiación del cuerpo negro". La dificultad consistía en que cuando uno trataba de explicar la radiación que emite la materia a una temperatura dada utilizando el tremendo arsenal teórico producido por la física clásica de Newton, Maxwell y Boltzmann, los resultados no eran compatibles con el experimento.

A Planck se le ocurrió introducir un mecanismo —para él muy artificial— que consistía en

*Presidente del Consejo Nacional de Participación Social en la Educación; coordinador de Asuntos Internacionales de la Academia Mexicana de las Ciencias; profesor e investigador del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



suponer que la luz estaba compuesta de partículas denominadas fotones. La fórmula que obtuvo entonces concordaba con los datos experimentales en todo el rango de temperaturas y frecuencias, lo cual le permitió atravesar el umbral de la fama, al menos entre los físicos de esa época. Durante la primera década del siglo XX, Einstein también propuso que la luz estaba compuesta de partículas, pero postuló que éstas tenían una energía proporcional a su frecuencia. La constante de proporcionalidad se denomina "constante de Planck", y el postulado de Einstein logró explicar el llamado "efecto fotoeléctrico". Fue esta idea de Einstein la que le valió el Premio Nobel, no sus contribuciones, mucho más profundas y revolucionarias, conocidas como "la relatividad especial" y "la relatividad general".

Hacia los años veinte, el físico danés Niels Bohr propuso un nuevo modelo del átomo a partir de otra idea revolucionaria, de Louis de Broglie, quien postuló que si la luz —durante muchos años entendida como un fenómeno ondulatorio—, se comportaba como haces de partículas

simultáneamente según los postulados de Einstein y de Planck, entonces los electrones —aquellas partículas que constituyen la corriente eléctrica común— también podrían comportarse como ondas. En el modelo de Bohr, el átomo estaba formado por un núcleo con carga eléctrica positiva rodeado de una nube de electrones alrededor de éste. Sin embargo, los electrones tenían una propiedad singular: sólo podían moverse en órbitas bien definidas, como resultado de su carácter ondulatorio, a pesar de que los electrones, cuando se miden como constituyentes de la corriente eléctrica, se comportan como partículas comunes y corrientes. Esto creó una visión verdaderamente esquizofrénica de la realidad, que la racionalidad de la mente científica hubiese desechado inmediatamente si no es por un detalle particular: el modelo de Bohr daba cuenta exacta de una buena parte de la espectroscopia química del átomo de hidrógeno. Aun así, la interpretación filosófica del concepto de realidad en la mecánica cuántica sigue siendo un importante tema de controversia intelectual.

Ante estos éxitos, varios físicos intentaron mejorar el modelo de Bohr. Así, y dado que entonces se permitía proponer ideas totalmente "locas" (siempre y cuando hubiese alguna concordancia con los datos experimentales), Pauli y Heisenberg introdujeron más conceptos revolucionarios, como el espín del electrón y el Principio de Incertidumbre, respectivamente, que condujeron a un enorme éxito. La tabla periódica de Mendeleev adquirió, de repente, una explicación lógica: el número atómico no era otra cosa más que el número de electrones y, de acuerdo con las posibles órbitas que éstos podían ocupar de acuerdo con los principios cuánticos, las regularidades y las propiedades de los elementos químicos se pudieron explicar con toda precisión; es decir, la existencia de gases nobles, los elementos alcalinos, los metales, los elementos aislantes, las moléculas comunes y casi, casi, el origen de la vida basada en el carbono y el nitrógeno. Los químicos adquirieron entonces una herramienta que ha sido invaluable para el progreso, auténticamente revolucionario, de la química moderna.

Hacia el inicio de los años treinta, Dirac intenta combinar la teoría especial de la relatividad de Einstein con la mecánica cuántica. Su resultado es una ecuación cuyas soluciones predecían la existencia de unas partículas extrañas. Por ello, Dirac no atribuía mucha importancia a su propio descubrimiento, pero resultó que su ecuación fue más inteligente que él. Las partículas extrañas se encontrarían experimentalmente pocos años después, es lo que se conoce actualmente como antimateria. Con la ecuación de Dirac se abrió un nuevo campo de la física, orientado a entender la naturaleza de los constituyentes fundamentales de la materia. Así nació la física de las partículas elementales, cuyo progreso ha sido continuo desde la década de los años treinta. El hecho es que la mecánica cuántica ha resultado ser la teoría más exacta producida por el intelecto.

Gödel y Turing

Hacia principios del siglo XIX, el famoso matemático Hilbert se dio a la tarea de establecer los 20 problemas fundamentales de las matemáticas de los que aún no se había encontrado alguna solución. Durante ese periodo se hablaba del

grial sagrado de las matemáticas como el lograr el establecimiento de un conjunto de postulados y axiomas a partir de los cuales se pudiesen derivar todos los teoremas y corolarios de las matemáticas: los que ya se conocían y todos los que se podrían conocer. El filósofo inglés Bertrand Russell decidió emprender ese enorme reto intelectual y crear una teoría axiomática de las matemáticas que explicara todo a partir de lo que él llamó la Teoría de Conjuntos. Durante sus investigaciones se encontró con dificultades lógicas como la siguiente: supongamos que en un pueblo se clasifican todos los varones adultos en dos clases: aquellos que se afeitan a sí mismos y aquellos que son afeitados por el barbero. Con este procedimiento se puede afirmar que cada varón adulto pertenece a una clase o a la otra. Pero surge la pregunta, ¿a qué clase pertenece el barbero?

Esto se conoce como la paradoja de Russell y representa el primer indicio de que quizás es imposible crear un sistema axiomático perfecto. Pero no fue sino hasta la década de los años treinta cuando el matemático Kurt Gödel vino a asestar un golpe mortal a la búsqueda del "grial sagrado". Gödel demostró que en un sistema axiomático formal hay aseveraciones de las cuales no se puede decidir su validez. Éste es el famoso Teorema de Gödel. Esto quiere decir que si uno logra establecer un conjunto completo de axiomas y postulados en un sistema formal, entonces éste nunca va a ser completo, en el sentido de que siempre habrá proposiciones cuya validez o falsedad será imposible demostrar.

El matemático Alan Turing se inspiró en las ideas de Gödel para proponer lo que él llamó la "máquina universal". A Turing le interesaba encontrar un método que permitiera decidir sin el número de operaciones necesarias para realizar cualquier cálculo matemático serían finitas o no. Para ello ideó el concepto de máquina universal como un dispositivo que haría operaciones, una a una, a partir de una serie de instrucciones previamente establecidas. Turing adquirió cierta fama porque su trabajo encontró una excelente aplicación que le permitió descifrar los códigos secretos del ejército alemán durante la segunda guerra mundial, basado en sus trabajos sobre máquinas universales.

Las aportaciones de estos dos grandes genios, Gödel y Turing, parecen pertenecer al recóndito mundo de la lógica formal. Sin embargo, estas ideas representan las semillas de lo que ahora conocemos como la computación moderna, porque iniciaron la búsqueda para la creación de dispositivos que automatizaran tareas repetitivas de acuerdo con un conjunto de instrucciones o programa previamente diseñado para estas funciones. La primera computadora se construyó en la década de los años cuarenta. Se alojaba en un recinto de más de sesenta metros cuadrados, funcionaba basada en miles de bulbos y consumía una cantidad de energía equivalente al de cien hogares. Esta instalación era un verdadero monstruo, pero sólo era capaz de hacer las mismas funciones que la primera computadora de escritorio diseñada en los años sesenta. ¿Cómo es que se logró tan tremenda miniaturización de las componentes electrónicas?

El transistor

El 23 de diciembre de 1947, los físicos de los laboratorios Bell, Shockley, Bardeen y Brattain anunciaron el invento del transistor: una pequeña pastilla de silicio que hacía las mismas funciones de los clásicos bulbos, pero con menor consumo de energía y de tamaño muy reducido. El principio del transistor está basado en un efecto cuántico propio de ciertos materiales denominados semiconductores, que permiten el paso controlado de la corriente eléctrica. Para 1958, Kilby logró grabar en una pastilla de silicio un circuito "integrado" con cinco transistores. En 1970, la empresa norteamericana Intel produce el microprocesador 4004 de cuatro bits, capaz de realizar 100 mil operaciones por segundo y constituido por 2,300 transistores. Entonces costaba 200 dólares. El microprocesador actual de Intel, el Pentium III, realiza mil millones de operaciones por segundo, contiene 9.5 millones de transistores y cuesta... lo mismo que el 4004 hace 30 años. Esta tendencia, que se ha mantenido sin variaciones desde 1965, se ha denominado la Ley de Moore, en honor de quien la propuso, el fundador de Intel. Esta ley establece que cada 18 meses la tecnología duplica el número de

transistores en una pastilla, al tiempo que disminuyen, en la misma proporción, el tamaño, el consumo de energía y su costo.

La genética

A mediados del siglo XX, dos científicos producen una nueva revolución científica: Watson y Crick anuncian la estructura de la molécula del ácido desoxirribonucleico (ADN). Esta publicación no hubiera salido del ámbito de los bioquímicos si no es por el hecho de que desde hacía varios lustros se pensaba que esta molécula contenía, de alguna manera, la información completa sobre la estructura genética de los seres vivos. El descubrimiento de Watson y Crick, la famosa molécula de la doble hélice, brindó una explicación de la vida a partir de un alfabeto de cuatro letras, cada una de ellas correspondiendo a uno de los nucleótidos que constituyen los peldaños del ADN. Cualquier segmento de esta inmensa molécula tiene la capacidad de replicarse —de aquí que sea la base de la vida tal y como la conocemos—, pero también la de hacer transcripciones que se traducen, dentro de la maquinaria celular, en la fabricación de 21 aminoácidos, los que a su vez crean las proteínas para todos los procesos vitales.

A principios de los años ochenta, el mismo Watson propuso un ambicioso proyecto internacional: la secuenciación del genoma humano, es decir, el estudio de cómo están ubicadas cada una de estas cuatro letras en los cerca de cuatro mil millones de peldaños en la molécula de ADN que constituyen el libro de la vida humana. Hace pocos meses, en julio de este año, se anunció formalmente la conclusión de este proyecto. A semejanza del descubrimiento de la fisión nuclear —que produjo los reactores nucleares y la física médica, pero también la bomba atómica—, las implicaciones del entendimiento de lo que es el genoma humano y sus funciones son verdaderamente abrumadoras.

En un artículo reciente, Juan Enríquez describe las características del mapeo del genoma y su influencia en la economía del mundo como resultado de la aparición de una disciplina científica emergente, la "genómica", orientada a

estudiar, diseñar y construir nuevas moléculas de importancia biológica.¹ Los productos potenciales que se pretenden obtener son de interés estratégico para una plétora de industrias: farmacéuticas, de biotecnología, agricultura, alimentación, químicas, cosméticas, ambientales, de energéticos y computación. Los indicadores que caracterizan las alianzas entre la nueva familia de megaempresas hablan por sí mismos.

Novartis es el mayor conglomerado surgido de la alianza Ciba-Geigy y Sandoz, con un valor que sobrepasa los 100 mil millones de dólares. La malograda unión de Glaxo y SmithKlein hubiera creado la tercera compañía más grande del mundo, con el control de aproximadamente 7.5% del mercado global farmacéutico. De haberse formalizado esa unión, el presupuesto anual para investigación de la nueva empresa sería superior al costo total estimado de la secuenciación del genoma humano, y la capitalización del mercado ¡hubiese superado el producto nacional bruto anual de 143 países!

Monsanto tiene una larga tradición como industria química, pero ya se ha transformado (o "reinventado", según la jerga neoliberal) en una compañía de ciencias de la vida al invertir, desde 1997, más de seis mil millones de dólares en biotecnología y genómica. Sus directivos esperan obtener resultados a corto plazo con nuevos productos agrícolas, al tiempo de integrar y hacer crecer su subsidiaria farmacéutica, la empresa Searle, y al absorber a otra compañía farmacéutica, American Home Products.

Una reorganización similar está en proceso en los otros tres gigantes de la industria química: DuPont, Dow Chemical y Hoechst, mediante la adquisición de empresas de la agroindustria, farmacéuticas y de biotecnología. La investigación que se realiza en el seno de estas compañías está orientada a crear cosechas y alimentos modificados genéticamente, o a producir animales transgénicos. Por ejemplo, se menciona que una manada de cabras genéticamente modificadas puede producir suficiente antitrombina III como para sustituir una fábrica de 115 millones de dólares.

Una configuración de poderío económico de esta índole conlleva varios riesgos. En particular, nos preocupa la dominación de un mercado tan

diverso por un reducido número de compañías cuyas prioridades sociales y económicas no son precisamente las de satisfacer, con equidad, necesidades tan básicas como la salud, la alimentación y la producción de energía. Por otra parte, la creación artificial de nuevas variedades biológicas, ya sean moléculas, plantas o animales, no implica necesariamente un enriquecimiento en la biodiversidad; al contrario, la producción de cosechas consideradas milagrosas por la cantidad de nutrientes o fármacos efectivos que contienen, puede conducir a una seria limitación en la variación de especies. Esto se ha reconocido como un enorme riesgo potencial al tener una fracción importante de los cultivos mundiales sujetos a situaciones ambientales que no han existido en el pasado.

Varias academias de ciencias en el mundo han organizado grupos de expertos a fin de establecer normas éticas y recomendaciones para la legislación ambiental sobre la investigación y el desarrollo de este tipo de productos. Bienvenidas sean estas iniciativas. Sin embargo, su alcance es todavía limitado en virtud de que no se abordan los cambios fundamentales que se están dando en los sistemas de valores sociales y culturales, es decir aquellos que históricamente se han calificado como universales.

Finalmente, en la actualidad existe un intenso debate en torno a cuestiones de derechos de la propiedad intelectual. Por ejemplo, en 1991, la oficina de patentes de Estados Unidos recibió 4,000 solicitudes relacionadas con secuencias de ácidos nucleicos. En 1996, el número de solicitudes ascendió a 500, mil. Independientemente de las cuestiones éticas concernientes a la propiedad intelectual de la caracterización de fragmentos del código genético, ¿es benéfico para la sociedad privatizar esta información? Las instituciones académicas y de educación superior piensan que este conocimiento debe ser del dominio público, en contra de la posición de las nuevas megaempresas.

Freud y las neurociencias

Sigmund Freud propuso, desde los inicios del siglo XX, una estructura que determinaría el comportamiento de los humanos a partir de su

propuesta sobre la idea del inconsciente como un segundo lenguaje del ser humano, que daría explicación a muchos actos conductuales, así como a varias patologías mentales. Al proponer una explicación del significado de los sueños, Freud reveló que los procesos mentales tienen una complejidad mucho mayor de la que se esperaba, y que éstos mismos estarían determinados por toda una serie de vivencias, principalmente a partir de la primera infancia. Según Freud, el inconsciente está dividido en tres estructuras básicas: el *superego*, como el conjunto de valores y limitaciones impuestas desde la familia y la sociedad; el *id*, que representa los impulsos primarios, instintos y apetitos; y el *ego*, como la integración de la propia percepción e identidad. Esta concepción del individuo vendría a dominar el entendimiento de la mente humana hasta mediados de la década de los años setenta, cuando el método reduccionista de la ciencia comenzó a intentar proponer nuevas explicaciones de los diversos procesos mentales a partir de la acción de las neuronas y de la forma en que éstas se comunican entre sí.

El descubrimiento de diversos tipos de neurotransmisores y su acción sobre los componentes del sistema nervioso vendría a brindar explicaciones coherentes de diversas patologías como la esquizofrenia, la depresión, la senilidad y el mal de Parkinson. Ahora se sabe que la acción de las neuronas está determinada por el tipo de neurotransmisor que está presente en las sinapsis de cada una de ellas, y se tiene también una localización más exacta de las funciones que desarrollan diversas regiones del cerebro. El surgimiento de la ciencia cognoscitiva que intenta explicar, entre otros conceptos, la forma en que aprendemos y desarrollamos el lenguaje, o bien si éste es una estructura propia del cerebro que nos permite construir una gramática universal, representa una de las fronteras más importantes de la ciencia cognoscitiva moderna.

Con el advenimiento de la computadora digital y el dramático desarrollo de las neurociencias, varios científicos y filósofos han centrado su atención en la posibilidad de crear inteligencia artificial. Desde los primeros intentos de modelar al cerebro humano como una red neuronal, hasta

los sofisticados proyectos de crear computadoras capaces de imitar muchos de los procesos cognoscitivos, la idea de desarrollar dispositivos "inteligentes" ha captado la imaginación de muchos individuos, al grado que representa una de las áreas de mayor dinamismo en la actualidad.

La biodiversidad

Desde el siglo XIX comprendemos el fenómeno de la evolución de las especies como un ajuste al medio por selección natural, que favorece la supervivencia de los individuos mejor adaptados. A partir de la publicación de las ideas revolucionarias de Darwin, la biología se ha transformado: de ser originalmente una disciplina meramente descriptiva a convertirse en una ciencia con un importante poder de predicción.

Pero fue a mediados del siglo XX cuando empezó a cobrar importancia la percepción de que la biodiversidad representa una componente crucial para los procesos evolutivos. Cuando la humanidad comenzó a percibir que las extinciones en la riqueza biológica representaban una severa amenaza para la supervivencia de la raza humana, se empezó a gestar una nueva revolución que, a diferencia de las anteriores, estaba sustentada en fenómenos dinámicos complejos, como es la vida misma, en lugar del método reduccionista de la ciencia tradicional. La idea central es que nuestro planeta está limitado en recursos, en la energía total que recibe del sol y en la velocidad con que se dan los cambios de materia y energía para sustentar comunidades ecológicas de toda índole, incluyendo las humanas.

El banco de germoplasma del Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y del Trigo, en Texcoco, alberga una colección singular que, en mi opinión, representa una de las mayores riquezas del mundo: se trata del banco de semillas de maíz que contiene todas las variedades de esta importantísima planta, desde las especies endógenas de América hasta las variedades más sofisticadas y adaptadas a varios tipos de condiciones de suelo y de climas. El



dogma fundamental de este centro, y sus homólogos del arroz y otras gramíneas en otros sitios del mundo, es que la protección y la conservación de la diversidad es el elemento fundamental para proteger a la vida humana en el planeta.

En las postrimerías del siglo XX, nos hemos percatado de que la biodiversidad está seriamente amenazada y que su conservación no es un lujo sino un elemento de supervivencia. La influencia del hombre sobre los recursos del planeta parece estar llegando a límites peligrosos, como lo evidencia una serie de fenómenos globales: la producción de gases, invernadero, el agotamiento de los acuíferos, la destrucción de la capa de ozono, el cambio radical en el uso del suelo en grandes extensiones, el cambio climático global y la salud de los océanos son, todos ellos, focos rojos que, además de que deben ser analizados con las poderosas herramientas de la ciencia moderna, requieren de

cambios fundamentales en los estilos de vida de una buena parte de la humanidad.

Conclusión

Éstas son, en mi opinión, las aportaciones fundamentales de la ciencia del siglo XX. Cada una de ellas ha transformado de manera radical, las estructuras sociales, económicas, políticas y culturales, para dar inicio en lo que ahora se ha dado por llamar la "Era del conocimiento". La primera revolución social se originó con la agricultura, en donde las extensiones de tierra y la captación del agua desempeñaron un papel fundamental. La segunda revolución se inicia cuando los recursos energéticos adquieren un carácter estratégico para impulsar las nacientes industrias, primero basadas en la máquina de vapor y, un siglo después, en el uso masivo de la energía eléctrica. La tercera revolución es aquella

en la que nos encontramos inmersos. Aquí, la energía y los recursos naturales dejan de tener la característica de fundamentales para dar lugar al conocimiento mismo como un bien estratégico, incluso desde el punto de vista económico.

Lo importante es que este fenómeno no impacta sólo al ámbito tecnológico sino que ha sido determinante en la revolución del conocimiento. Según Castells, el nuevo paradigma se caracteriza por un círculo virtuoso de interacción entre el conocimiento, como origen de la tecnología, y la aplicación de esa tecnología para mejorar el procesamiento de la información y la generación del conocimiento.² Gracias a la evolución de los microprocesadores, ha sido posible involucrar a un gran número de biólogos moleculares del mundo en el gigantesco proyecto internacional conocido como la secuenciación del genoma humano. Sin el formidable desarrollo computacional que se tiene ahora, sería imposible abordar un proyecto de esta naturaleza.

Lo que esto implica es que la famosa Ley de Moore no se aplica sólo al desarrollo de los semiconductores sino que también es válida y actúa sobre el conocimiento mismo: el conocimiento crece de manera exponencial, pero el entendimiento y la comprensión del mismo aumenta sólo en forma lineal. Se dice entonces, con toda razón, que los conocimientos que adquirió un profesionalista durante su preparación universitaria, serán obsoletos mucho tiempo antes de su jubilación. De ahí la necesidad de aprender a lo largo de la vida. Sin embargo, sólo

mediante el entendimiento cabal del proceso de cambio puede una sociedad ajustar el conjunto de valores y normas éticas que la rigen. Por lo tanto, el conflicto ocasionado por la velocidad del cambio en la generación de conocimiento nuevo, frente al ritmo que requiere el razonamiento de sus posibles efectos sociales y culturales, tenderá a acentuarse significativamente durante los próximos años.

La universidad pública es, por excelencia, el recinto donde se gestó una buena parte de cada una de las revoluciones científicas del siglo XX. Por eso mismo, representa en la actualidad el espacio más adecuado para enfrentar los paradigmas que nos lanza la época actual, no sólo porque se trata de un paradigma relacionado directamente con el conocimiento, la materia prima de las universidades, sino porque, como todos los periodos revolucionarios, los cambios de paradigmas acarrearán una serie de conflictos de toda índole. Pero sólo un espacio libre, inteligente y abierto a las ideas nos puede brindar las herramientas y el poder creativo para hacer de la participación social un potente instrumento, en la comprensión cabal del vertiginoso cambio que surgió del "Siglo de la ciencia".

Notas

1. Enríquez, Juan. "Genomics and the World's Economy", en *Science*, vol.281, 1998, p.925.
2. Castells, Manuel. *The rise of the Network Society*, Blackwell, Oxford, Inglaterra, 1996.

