

# el arte de lo invisible. logros, beneficios sociales y desafíos de la nanotecnología

SANDIP TIWARI Y ROBERT MCGINN

1

En el Este, la Universidad de Nalanda existió desde el siglo v al xii. La universidad oriental más antigua que pervive en la actualidad es la de Al-Karaouine, en Marruecos, fundada en 859, y de las occidentales, la de Bolonia, de 1088. Las primeras universidades surgieron a partir de instituciones religiosas y fueron ganando independencia conforme declinaba el poder de la jerarquía eclesiástica.

2

J. Craig Venter, un importante contribuyente a la secuenciación de los genes humanos en la compañía Celera Genomics dirige hoy el J. Craig Venter Institute, una entidad autofinanciada dedicada a la investigación, cuyo éxito más reciente ha sido el progreso hacia la construcción de la célula artificial. Leroy Hood, que estuvo entre los pioneros del diseño de herramientas para el diagnóstico molecular, dirige el Institute for Systems Biology, una institución independiente. Estos ejemplos no difieren gran cosa de los de Thomas Edison, Graham Bell o Nikola Tesla a finales del siglo xix.

La historia de la ciencia y la ingeniería como fuerzas sociales de importancia es relativamente breve. La mayoría situarían su origen en la revolución copernicana del siglo xvi, es decir, que su existencia equivaldría a menos de la cuarta parte del tiempo que el hombre lleva sobre la Tierra. Con la llegada del progreso científico —y su empleo de herramientas agnósticas de matemáticas, cuestionamiento, postulación, teorización, predicción, verificación, creer en teorías lo suficiente como para seguir adelante en las investigaciones pero al tiempo dudando lo bastante como para detectar errores y fallos— llegó también el enfoque moderno del aprendizaje y la invención. Superar los dogmas, incluso frente a observaciones contradictorias, puede constituir un desafío para la sociedad y así será siempre; la comodidad que supone hacer «el trabajo de siempre» no es algo a desdeñar. Todo esto es cierto también en la empresa científica. Pero las ciencias físicas y de la naturaleza, la ingeniería y las matemáticas en tanto que áreas de trabajo son de las pocas empresas en las que las revoluciones pueden ocurrir con relativa facilidad. La teoría de la relatividad de Einstein —el «absoluto» de la velocidad de la luz y la gravedad como deformación del espacio-tiempo, la mecánica cuántica como una concepción completamente nueva de la mecánica para describir la realidad basada en enfoques probabilísticos—; también la comprensión filosófica de la realidad como resultado de la observación; el teorema de Gödel sobre los límites de la «demostrabilidad» dentro de un sistema

axiomático; la descodificación genómica del origen de la vida y la comprensión del metabolismo, la replicación y la reproducción, son todas ideas que fueron rápidamente adoptadas por la comunidad técnica una vez superaron el examen del enfoque científico.

La búsqueda científica de verdades y el impulso de ponerlas en práctica no conocen fronteras nacionales y se adaptan a las condiciones de cada época. Entre los progenitores de los albores de la civilización científica, Copérnico fue un hombre de Iglesia y polaco; Bruno, que pagó con su vida la defensa de sus creencias frente al dogma, fue teólogo de Italia; Tycho de Brahe, el matemático imperial, era de Dinamarca, y Johannes Kepler, alemán, y Galileo Galilei fueron profesores en Italia. No todos los pioneros de la ciencia fueron profesores, aunque las universidades como instituciones dedicadas a la enseñanza<sup>1</sup> existen desde hace mucho tiempo. En el siglo pasado Albert Einstein comenzó como abogado de patentes, y las contribuciones científicas de Neils Bohr surgieron de su estilo de vida nómada, que le hacía alejarse de la institución estatal donde trabajaba, un poco a la manera de Copérnico y Kepler. En la actualidad, cuando el poder y el impacto económico de la ciencia y la ingeniería han aumentado de forma drástica, se han fundado numerosas instituciones dedicadas a la investigación impulsadas por los científicos mismos<sup>2</sup> que se autofinancian o bien están financiadas por filántropos y otra suerte de mecenas modernos: inversores de capital riesgo y fundadores de pequeñas com-

pañías que se han enriquecido inmensamente gracias a aplicaciones de ciencia y de ingeniería. Las universidades, como en el pasado, desempeñan su papel, pero no son los únicos agentes de progreso. Los laboratorios fundados por el Estado, los independientes y los industriales, en especial los dedicados a las ciencias biológicas, colaboran también en la investigación científica y en sus aplicaciones.

Una revolución científica se origina a partir de individuos poseedores de una increíble voluntad y fortaleza interior, personas capaces de generar una poderosa fuerza centrípeta a partir de un único concepto como principio organizador universal.<sup>3</sup> El progreso científico, periodo de consolidación, se produce porque hay individuos que persiguen varias conclusiones de forma centrífuga empleando una gran variedad de recursos para aprovechar las conexiones centradas en el principio organizador de un mundo lleno de complejidad. El progreso en la ciencia y la ingeniería depende tanto del descubrimiento central como de su posterior articulación. La creación de Mendeleev de la tabla periódica antes de que se conocieran las partículas y los átomos; la formulación de Darwin del principio de la evolución sin ninguna clase de conocimiento molecular, genético y orgánico, y el desarrollo de Heisenberg de la mecánica cuántica que reemplazó el determinismo newtoniano son ejemplos de superación de dogmas y creación de principios científicos nuevos.

Darse cuenta de que la química, la biología y la física tal como las conocemos y las empleamos hoy en ingeniería y medicina prácticamente no existieron hasta hace sólo un siglo y medio es toda una lección de humildad. A partir del descubrimiento y comprensión de los elementos químicos pronto desarrollamos la capacidad de fabricar amoníaco, y a partir de ahí fertilizantes para la agricultura que hacen posible la existencia de casi 7.000 millones de personas sobre la Tierra. Las interacciones genéticas y la progresiva comprensión de las mutaciones constituyen enfoques fundamentales en la lucha contra las enfermedades y harán posible que las personas vivan mejor y más tiempo. La informática y las comunicaciones, que dependen directamente de la electrónica, desarrollan los principios de su *hardware* a partir de la mecánica cuántica y de la teoría de la información. Somos muy afortunados de vivir en una época de descubrimientos y asistir a la aventura de la aplicación práctica de todos ellos.

Los avances centrífugos también dependen de la disponibilidad de herramientas: instrumentos de observación y creación. Cuanto más pequeña es la herramienta, mayores son las probabilidades de que sea personalizada o, lo que es lo mismo, individualizada y humanizada; es decir, de más fácil manejo. Debido a esta cualidad las herramientas son empleadas por numerosos científicos e ingenieros, que estimulan así su creatividad, lo que a su vez repercutirá en gran parte de la sociedad. El molino de agua evolucionó hasta convertirse en la máquina de vapor, y de ahí al motor eléctrico, de combustión, etcétera. Cada uno surgió

bajo muchas formas. El motor de combustión, con distintos formatos, propulsa al avión, el coche y la motocicleta. El motor eléctrico hace funcionar el tren, el aire acondicionado e incluso el disco duro de un ordenador portátil. Hoy sabemos que existe un motor de energía molecular, llamado ATP sintasa, que convierte energía química en movimiento mecánico dentro de nuestro organismo. ¿Quién sabe qué puertas abrirán este descubrimiento y sus reproducciones sintéticas en el laboratorio? Pero el propósito común que ha impulsado este proceso de miniaturización es el de encontrar aplicaciones que son útiles a los seres humanos. Los procedimientos médicos han cambiado drásticamente gracias a las herramientas endoscópicas; en la mayoría de los casos los ingresos prolongados en hospitales se han eliminado, el teléfono móvil y otros instrumentos de comunicación están por todas partes, incluso en las regiones más pobres del mundo, supuestamente con grandes beneficios derivados de un mejor intercambio de información. Los programas de *software* para escribir, dibujar y visualizar en nuestros pequeños ordenadores son innumerales. En todos estos casos la miniaturización y la personalización han tenido un impacto espectacular.

El progreso tecnológico tiene también, por supuesto, su lado oscuro en función de las innovaciones mismas y de la forma en que son difundidas y utilizadas. Los fertilizantes, los ordenadores y los motores de combustión consumen grandes cantidades de energía,<sup>4</sup> son agentes contaminantes y han alterado el equilibrio del planeta. La Revolución Industrial en Europa redujo de forma drástica la esperanza media de vida. Gran parte de la energía consumida en el mundo hoy tardó miles de millones de años en acumularse en nuestro planeta, haciendo posible la existencia de 7.000 millones de humanos, en lugar de, tal vez, 1.000 millones, pero a cambio afectando el clima global. El impacto de las herramientas personalizadas es de efecto multiplicador. Los coches son un buen ejemplo de ello, pero también lo es el teléfono móvil. Cada nueva creación y las nuevas maneras en las que interactúan la sociedad en su conjunto y los individuos entre sí generan una nueva línea divisoria entre tener y no tener, entre aquellos que se adaptan y los que no, entre quienes aprenden y se benefician económica y socialmente de las herramientas y aquellos que no lo hacen. De manera que, mientras la media puede ser elevada, suelen aparecer desigualdades. Debido a que la tecnología a menudo facilita las tareas manuales, aquellos que se encuentran en el peldaño inferior de la escalera económica son más susceptibles de salir perjudicados con las nuevas tecnologías.

En este contexto social analizaremos ahora la promesa y los desafíos de la nueva y floreciente era de la especialización técnica: la ciencia, la ingeniería y la tecnología a nanoescala, a menudo resumidos con el término «nanotecnología». Básicamente la nanotecnología es un fenómeno relativo al tamaño, a la dimensión. Al igual que la biología, que abarca una gran variedad de ciencias de la

<sup>3</sup> Para citar a Arthur Koestler, «cuanto más original es un descubrimiento, más obvio resulta a posteriori».

<sup>4</sup> Se considera que las industrias de fertilizantes y de la información suponen casi un 10% del consumo total de energía, y el motor de combustión aún más.

vida, la nanotecnología afecta a aquellas áreas de la ciencia, la ingeniería y la tecnología donde interviene la escala. Tal vez en el futuro decidamos llamarla «nanología» para reflejar así este amplio radio de influencia, en lugar de hablar de nanotecnología, nanociencia y nanoingeniería.

Si tomamos cualquier material a granel que podamos ver con los ojos, ya se trate de material duro o blando, orgánico o inorgánico, y lo hacemos más pequeño, sigue conservando algunas propiedades. Un trozo grande de diamante, de hierro o de caucho posee las mismas propiedades que uno pequeño, y estos materiales y su reproducibilidad nos serán más útiles cuando conservan sus propiedades después de reducidas sus dimensiones. Los puentes pueden ser grandes y pequeños, un solo carril para coches sobre un riachuelo o lo suficientemente amplios para permitir que un tren cruce el océano. El plástico se emplea en los coches y también en pequeños relojes de pulsera. Por otra parte, si vamos al extremo contrario y reducimos el tamaño de un material al máximo, es decir, a escala atómica o molecular, sus propiedades serán completamente distintas. Un átomo o molécula tiene propiedades que resultan de las interacciones de mecánica cuántica y que conducen a su existencia como unidad estable. El carbón a escala atómica forma diamantes, pero también grafito, y además es el principal componente del hollín, resultado de combustión ineficiente. Todas estas formas de carbón poseen diferentes propiedades, de manera que la transición de la escala atómica a la escala a granel implica una transformación en las propiedades del material, que se mide en nanómetros. Las propiedades de los materiales y sus interacciones físicas y químicas surgen de las fuerzas de la naturaleza: el enlace atómico o molecular es resultado de la mecánica cuántica y de fuerzas electromagnéticas. Por medio de las interacciones de y entre átomos, moléculas, electrones —portadores de corriente eléctrica—, y fotones —portadores de luz— los procesos químicos y biológicos experimentan una transformación radical de sus propiedades a nanoescala. Ello resulta en que el átomo y la molécula se ensamblan por un lado y los materiales a granel por otro. La razón es que las fuerzas que están en el centro de estas interacciones, las que resultan de las propiedades características, son básicamente de naturaleza nanométrica.

Y los cambios a nanoescala no son simplemente más pequeños; pueden ser tan radicales como la aparición de nuevas propiedades a las que antes no teníamos acceso ni a macro ni a microescala.

El tunelado de la mecánica cuántica es un fenómeno que se ha empleado con éxito en la última década: en memorias semiconductoras que no pierden sus datos y no tienen parte móvil, como las que emplean una cámara fotográfica, un teléfono móvil y el *thumb drive* o unidad de almacenamiento en miniatura. En estos mecanismos los electrones circulan por una región de aislamiento magnético a bajo voltaje (tunelado). Ello sucede gracias

a la naturaleza ondulante del electrón y la capacidad de la onda de penetrar pequeñas distancias —distancias de nanoescala— que generan un aislamiento magnético. Las propiedades básicas tales como temperatura de fundición, magnetización, capacidad de corriente eléctrica, etcétera, pueden alterarse sin que cambie la composición química del material, debido precisamente a este comportamiento ondulante y a las interacciones que se producen a nanoescala, una propiedad que los sopladores de vidrio de la Edad Media empleaban en la fabricación de vidrio policromado. El vidrio policromado a menudo emplea nanopartículas de oro y plata que crean el rojo, el azul, el marrón y otros colores resaltando la diseminación de un color particular dependiendo del tamaño de las partículas. Los electrones presentes en nanopartículas de oro y plata interactúan con los fotones de luz creando el color. Los científicos describen esta interacción colectiva entre electrones de plasma y fotones mediante una partícula a la que llaman «plasmón». Los sopladores de vidrio desarrollaron sin saberlo la tecnología que permite precipitar estos plasmones de forma controlada a ese tamaño. La luz que transportan las fibras ópticas y que hace posible la rápida transmisión de datos se fabrica empleando láseres que constituyen fuentes de luz altamente eficientes por medio de interacciones entre electrones y fotones que surgen a nanoescala en pozos cuánticos artificialmente creados. Incluso la fibra óptica emplea confinamiento de luz a nanoescala para desplazarla con las mínimas pérdidas posibles a través de largas distancias.

Las reacciones químicas resultan de interacciones entre átomos y moléculas en estado neutro o activado o excitado. Las especies resultantes de esta reacción necesitan acercarse y disponer de vías favorables desde el punto de vista energético para que las reacciones sean efectivas. La catálisis es central a la hora de hacer posible esto: un catalizador, aunque permanezca químicamente inalterado, proporciona una vía de baja energía a los índices crecientes de reacción. Para ello crea una superficie en la que se juntan las moléculas y reaccionan unas con las otras en condiciones energéticamente favorables, dejando el catalizador inalterado una vez finalizadas las reacciones. Cuando descendemos al nivel de las pequeñas dimensiones, aumenta la relación superficie/volumen, un efecto de la nanoescala. Un mero reforzamiento no lineal de esta sencilla propiedad hace la catálisis enormemente efectiva. El proceso Haber-Bösch de producción de amoníaco, un ingrediente clave en la fabricación de fertilizantes, emplea la catálisis en muchas de sus etapas. El hidrógeno se obtiene del metano presente en el gas natural empleando óxido de níquel. El amoníaco se forma a partir de nitrógeno y de este hidrógeno empleando hierro, derivado de la magnetita, con una eficiencia de conversión última del 99%, es decir, casi perfecta.

La magnetita, una forma de óxido de hierro, es un material cuyas propiedades nanométricas ha empleado la naturaleza durante siglos, desde antes incluso que existie-

ran los sopladores de vidrio. La magnetita es magnética. Puesto que está hecha de una colección de nanocristales ordenados en forma de cadenas y que por tanto constituyen un magneto altamente sensible, dota a los organismos de una propiedad llamada magnetotaxis, que es la capacidad de responder a los campos magnéticos de la Tierra. Así, la *Magnetospirillum magnetotacticum*, una bacteria que se encuentra en estanques y que fue aislada por vez primera en 1975 junto con muchas otras, es magnetotáctica porque en pequeña escala y formando un conjunto, un organismo primitivo puede identificar desviaciones de los campos magnéticos terrestres. Muchas especies animales emplean la información magnética para orientarse, incluidas la paloma, la tortuga boba y la langosta espinosa. En el proceso evolutivo la naturaleza desarrolló maneras mediante las que los nanocristales inorgánicos podían agruparse en sistemas mayoritariamente orgánicos, algo que aún estamos aprendiendo a hacer de forma controlada en el laboratorio. Otro ejemplo interesante de escala nanométrica en la naturaleza es el color iridiscente de algunas mariposas y plumas de pavo real. Son efectos ópticos a nanoescala resultantes de las estructuras tridimensionales que crea la naturaleza, y su recreación en laboratorio se encuentra todavía en fase temprana. Los fenómenos biológicos tienden a ser inmensamente complejos, al ser resultado de una combinación aleatoria de hechos y de un gran número de interacciones que se producen entre gran número de entidades bajo la influencia de fuerzas locales. Estos fenómenos son sensibles a las condiciones iniciales y a mínimas perturbaciones, tienen un gran número de componentes en continua interacción y a menudo también un gran número de vías por las que puede evolucionar el sistema. Si un ser humano recibe una cantidad insuficiente de energía, es decir, si no ha comido lo suficiente, su cuerpo sabe cómo ralentizar el metabolismo. A diferencia de mucho de lo que hacemos en los campos de la física, la química y la ingeniería, esto es algo mucho más complejo e implica una variedad de interacciones a diferentes escalas. Que esos organismos simples y complejos hayan encontrado la manera de hacer que dominios magnéticos a nanoescala de un solo cristal adquieran estas propiedades es un tributo a los recursos de la naturaleza y a la inteligencia de la biología, características que la especie humana descubre con regularidad.

Las últimas décadas prepararon el terreno para el desarrollo de la ciencia y la ingeniería de la materia condensada, donde el empleo de herramientas pequeñas y personalizadas se difundió y la capacidad de controlar y observar a nanoescala se volvió accesible para un gran número de personas. Estas herramientas nos permiten ensamblar, manipular, controlar, sondear, fotografiar y observar una miríada de propiedades a nanoescala. De todas las herramientas, las que más publicidad han recibido son el microscopio tunelador escáner y la microscopía de fuerza atómica. Pero igualmente importantes han sido

las herramientas de fabricación que nos permiten definir y ensamblar a escala nanométrica, las nuevas técnicas para visualización, los instrumentos que permiten el autoensamblaje de monocapas en superficies, las herramientas que hacen posible sintetizar y, en general, las que nos permiten hacer todo esto en serie, rápidamente y a bajo coste. Ahora tenemos la capacidad de sintetizar átomo a átomo y también de esculpir los materiales hasta descender el nivel atómico. Podemos testar fenómenos que se producen a nanoescala a través de una amplia variedad de herramientas, que a su vez hacen posible una variedad de enfoques. Y debido a que las propiedades cambian radicalmente cuando se desciende al nivel de las unidades más pequeñas, podemos actuar sobre ellas mediante técnicas de ensamblado y escultura. Esto, a su vez, ha hecho posible que una amplia comunidad de individuos pueda descender al mundo de la nanoescala. La nanoescala es una dimensión, no una disciplina, y sus propiedades se ponen de manifiesto en y están relacionadas con todas las disciplinas. El resultado de esto, a través de la participación a gran escala de la comunidad y la amplitud de disciplinas, ha sido que en las interfaces ha surgido un nuevo y gran campo de trabajo. La ingeniería, las ciencias físicas y de la vida han convergido como nunca antes lo habían hecho. Y ello ha conducido a niveles de progreso y utilidad que hasta hace una década resultaban inimaginables.

Unos pocos ejemplos de esta variedad, que reside en el corazón de la existencia humana, ilustrarán este punto. Examinemos algunos de los desafíos a los que en la actualidad se enfrenta el mundo. Los más importantes tienen que ver con la sostenibilidad, con que una comunidad compleja y cada vez más amplia de personas y de millones de otras especies puedan vivir de forma sostenible, a saber, en equilibrio las unas con las otras y con el mundo natural. La energía, la salud, la igualdad, la pobreza, la educación y la conservación son asuntos que nos vienen inmediatamente a la cabeza como pasos previos para la sostenibilidad. Pronto surgen también determinadas preguntas: ¿podemos reducir el consumo de energía en transportes, en iluminación, producción de alimentos y otras facetas de la vida diaria mediante una recreación de nuestro entorno (calefacción, refrigeración y estética) y de las comunicaciones (en el intercambio de información, en informática y en todos los instrumentos móviles)? ¿Podemos ayudar a solucionar los problemas de escasez de agua produciendo agua limpia, eliminando impurezas derivadas de los metales pesados tales como el arsénico y reduciendo el consumo de agua? ¿Podemos mejorar la productividad agrícola desarrollando plantas de consumo saludable que sean más resistentes a las enfermedades y consuman menos energía y menos agua? ¿Podemos diseñar un secuestro más eficiente del carbono empleando enfoques físicos y biológicos? ¿Podemos mejorar la gestión de los recursos forestales consumiendo menos papel e introduciendo técnicas de producción de papel más efi-

cientes? ¿Podemos mejorar la asistencia sanitaria haciendo posible diagnósticos más tempranos y menos costosos, detectar la contaminación, curar enfermedades, mejorar el tratamiento o ralentizar el avance de las enfermedades degenerativas y atacar las más perniciosas como la malaria y el cáncer? La nanotecnología encierra la promesa de una posible respuesta a todas estas preguntas.

La fortaleza de los materiales y las propiedades de superficie de éstos se emplean en todas partes. Los polímeros, cuya síntesis a escala industrial se generalizó a mediados del siglo xx, son hoy prácticamente ubicuos. Hay quien argumentaría que los plásticos fueron la columna vertebral de la revolución industrial de China y la clave de la transformación de la vida cotidiana, con su empleo en la fabricación de juguetes infantiles hasta las bolsas de la compra y envoltorios variados. Los plásticos y los polímeros adquieren sus propiedades mediante interacciones de superficie de cadenas de hidrocarburos y ambos se han visto beneficiados de los nuevos inventos nanotecnológicos. Los nanotubos de carbono, basados en un fuerte enlace entre los átomos de carbono —una configuración distinta de la del diamante— proporcionan propiedades de interacción de superficie intrínseca; soportan fuerzas más poderosas que el acero de dimensiones similares.<sup>5</sup> Si se transforman en hebras, de manera similar a como se hace con los polímeros, tendremos materiales de gran resistencia. Los nanotubos de carbono se están empezando a incorporar a la fabricación de plásticos para hacerlos más resistentes, por ejemplo en material deportivo como raquetas de tenis y palos de golf. Compuestos como el hormigón, la fibra de vidrio y el Kevlar son combinaciones de materiales que se vuelven más fuertes gracias a interacciones de superficie. El hormigón puede hacerse más ligero y conservar no obstante su resistencia mediante el uso de cenizas, las estructuras huecas de sílice y alúmina parecidas a los fullerenos (molécula de carbono C<sub>60</sub>) presentes en las cenizas de plantas de energía de carbón. La resistencia del nanomaterial y la poderosa interfaz hacen posible que estos compuestos sean más fuertes que nunca. La superficie es clave en esta propiedad.

Hemos mencionado la catálisis y su importancia en los procesos de producción de amoníaco como uno de los grandes avances del siglo xx. Hoy los zeolitos desempeñan un papel similar. Son sólidos microporosos que se transforman en eficientes catalizadores a partir de óxidos de aluminio y silicio. Usados en millones de toneladas ayudan a craquear el petróleo para la obtención de gasolina e hidrocarburos, reduciendo el impacto ambiental del petróleo.

Parece probable que los avances en nanotecnología tengan efectos muy positivos en la producción y consumo de energía, en las comunicaciones y en la salud. Consideremos algunos de ellos.

Las células de combustible, la energía fotoeléctrica y la conversión de energía fotoeléctrica son ejemplos de que las mejoras eficientes relacionadas con la energía están

aumentando rápidamente gracias a nuevos materiales, las membranas ultra delgadas y los nuevos procesos de conversión. Las fuentes de luz obtenidas mediante semiconductores son altamente eficientes, con un factor de sostenibilidad 10 frente a la bombilla incandescente; además resultan más fiables y duraderas. Hoy podemos verlos en semáforos, pero pronto también en el alumbrado general, en cuanto se resuelvan cuestiones relativas al coste y a la preferencia de ciertos colores. También se están creando fuentes de luz a partir de materiales orgánicos, aunque en este caso el desafío de la fiabilidad es mayor. La generación de luz fotovoltaica también se está beneficiando de los avances a nanoescala. Un nuevo tipo de célula solar, llamada Grätzer, comienza a hacer su transición de los laboratorios a la fabricación industrial. Estas células utilizan titanio nanocristalino, colorantes y materiales orgánicos en el transporte de electrones para alcanzar un porcentaje de eficiencia en la conversión energética. El titanio es un material que se encuentra en la pintura, en el papel de lija y en muchos otros lugares donde interviene la fuerza. También absorbe protones de manera eficiente y por tanto se emplea en lociones solares. Las nuevas estructuras fotovoltaicas emplean procesos de baja energía en su fabricación, a diferencia de la mayoría de los silicios fotovoltaicos populares hoy día, reduciendo también en consecuencia el coste y la energía requerida para su fabricación. Las interacciones reforzadas de superficie pueden ayudar a controlar la contaminación. En regiones densamente pobladas como la llanura Indogangética, el descenso de la pluviosidad ha dado lugar a grandes concentraciones de arsénico originado por causas naturales en los pozos de agua potable. La mayor eficiencia de los procesos electroquímicos aplicados a la superficie hace posible depurar el arsénico con ayuda de nanopartículas de óxido de hierro.

La electrónica, la informática y las comunicaciones se han beneficiado enormemente de las propiedades de la nanoescala, en la cual las ondas de electrones y el material interactúan de múltiples maneras para producir interesantes propiedades. Consideremos, por ejemplo, el almacenamiento de datos. En la actualidad la humanidad crea cada día más datos que la cantidad total de éstos almacenada hace 20 años. El almacenamiento semiconductor no volátil se emplea en cámaras de fotos, teléfonos, minirreproductores de música y también para almacenar e intercambiar información. Esto funciona porque tiene lugar, a nanoescala, un fenómeno de mecánica cuántica llamado «tunelado». El inmenso volumen de datos que procesa Google y que las empresas almacenan es viable porque las unidades de disco magnéticas almacenan más en menos espacio, es decir, son más compactas y también cuestan menos. Esto es posible porque se han aprovechado la rotación (*spin*) del electrón y las interacciones de campo que se producen a nanoescala. Nuestra veloz infraestructura de comunicaciones depende de la transmisión óptica. Lo diodos láser de pequeño tamaño y los amplificadores y las fibras ópti-

5

En la actualidad hay una enfermedad que se está extendiendo entre la comunidad científica: la sobreabundancia de supuestos hallazgos que bordean la incredulidad. Esta enfermedad, que siempre ha existido, es hoy particularmente perniciosa porque la amplia variedad de disciplinas existentes hace difícil a muchos discernir los hallazgos verdaderos de los que no lo son. Tal vez se trate de un problema social y ético, provocado por la presión que reciben los científicos para que justifiquen sus investigaciones. Existe también una escuela de pensamiento que, con un exceso de optimismo y euforia, anima a los jóvenes a que se dediquen a la investigación científica e ingenieril, una tendencia que se ha visto favorecida por la llegada de Internet, el fenómeno de la inmediatez y la facilidad para crear imágenes visuales poco realistas mediante *software* personalizado. Los nanotubos de carbono para supuestos ascensores espaciales son uno de estos mitos (ver: «The space elevator: going down?», en *Nature* online, publicado el 22 de mayo de 2006 y disponible en <http://www.nature.com/news/2006/060522/full/news060522-1.html>). Existen otras teorías semejantes relativas al uso de moléculas y otros enfoques a la electrónica a escala atómica.

cas emplean confinamiento de portadores y fotones en dimensiones reducidas para obtener una mayor eficiencia en generación y transmisión de señales. Los mecanismos de menor tamaño también consumen menos, de manera que el índice de consumo energético por mecanismo ha disminuido con el tiempo. Sin embargo, la personalización de pequeñas herramientas, por ejemplo, ordenadores, también significa que ha aumentado su número de usuarios. De ahí que las cifras generales sigan siendo las mismas.

El empleo generalizado en electrónica de estos mecanismos de detección y control también ha sido determinante en cómo se aplica la nanotecnología a la ciencia. Uno de los principales desafíos en biociencia ha sido la comprensión minuciosa de los fenómenos bajo las condiciones químicas y físicas específicas que se dan en entornos reales. La invención de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR por sus siglas en inglés) proporcionó una técnica para amplificar una muestra de ADN que fuera de interés, posibilitando hacer tantas copias de la misma como se precisaran para su estudio y análisis. En forma de nanoherramienta, el PCR hizo posible generar millones de copias de una hebra concreta de ADN y usarlas para manipulación genética. Las técnicas de microconfiguración (*microarray*), monoclonales y de prótesis fluorescentes han resultado ser igualmente provechosas. Gran parte de la investigación biológica, sin embargo, continúa dependiendo del análisis estadístico de datos, en los cuales se producen una gran cantidad de interacciones como las mencionadas y a continuación se extraen de ellas los modelos posibles para describir la especificidad. Las técnicas de la ciencia física tienden a descartar todos los fenómenos superfluos y a simplificar el sistema de forma que las propiedades relevantes puedan estudiarse con el debido rigor. Con la aparición de numerosas «nanotécnicas», es decir, técnicas capaces de descender a la escala más pequeña que existe, comienza a ser posible evitar la dependencia del análisis estadístico y estudiar las posibilidades de manera exhaustiva.

Hacer esto, no obstante, requiere disponer de ultrasensores. La nanotecnología permite fabricar una gran variedad de ellos. Una molécula fluorescente puede ser reemplazada por una nanopartícula ópticamente más activa sintonizada con una longitud de onda específica y ligada a una molécula cuya química se está estudiando. Se pueden usar las interacciones plasmónicas (de electrones de plasma y electromagnéticas) para localizar el calor durante el emparejamiento energético a escala nanométrica. Las vigas empleadas en construcción pueden reducirse hasta el punto de que sea posible detectar la sensibilidad al peso a escala de un solo átomo. Las nanoherramientas pueden empujarse para aislar y testar células en enlaces bi- y tridimensionales. Es posible también usar pinzas ópticas para atrapar nanopartículas, desplazarlas y, si se quiere, estudiar sus distintas reacciones así como las moléculas unidas a ellas. Por tanto hoy día

resulta concebible colocar nanopartículas y otras herramientas para que observen e interactúen *en el interior* de células y tejidos y observarlas y representarlas ópticamente a tiempo real, lo que permitiría descifrar el complejo funcionamiento interno de la célula. Es posible trabajar con estas herramientas en condiciones realistas debido a los grandes avances realizados en detección, representación óptica y control que la nanoescala ha hecho posibles.

Los científicos tienden a menospreciar lo que es posible lograr a corto plazo —digamos diez años— y también lo que puede hacerse a largo plazo: cincuenta años. Lo que resulta muy interesante de la nanotecnología es que, debido a que se basa en la escala nanométrica, tiene aplicaciones en muy diversas disciplinas. Nunca antes en la historia de la humanidad han generado los científicos información de tanta utilidad para los más variados ámbitos. La última década ha sido un buen comienzo, pero conforme se desarrollen las herramientas y la comprensión de la nanotecnología se descubrirán nuevas aplicaciones que surgirán de la intersección entre distintas disciplinas. El progreso deberá mantener su ritmo tanto en la ciencia física como en la ingeniería, de manera que la iluminación fotovoltaica, la informática de consumo eficiente, el almacenaje y obtención de información y las comunicaciones continúen avanzando. Puede argumentarse, con razón, que la química y la ciencia de los materiales deberían haberse centrado en la nanotecnología desde el principio; después de todo, la catálisis o la síntesis de moléculas, la preparación de compuestos y los recubrimientos duros se conocen desde hace tiempo y se basan en interacciones a nanoescala. Lo que sí es nuevo es que los sensores ultrasensibles nos dan la capacidad de comprender estos fenómenos mejor. Las nuevas técnicas de síntesis —de membranas, de nanocristales y de nuevos materiales— deberían contribuir a mejorar la tecnología allí donde la sociedad más lo necesita: en células de combustible, almacenamiento de energía y control de la contaminación. En el campo de las ciencias de la vida, el uso de nanoherramientas y el desarrollo de la nanotecnología están dando aún sus primeros pasos. Para que pueda ser de más utilidad las herramientas deben ser de más fácil manejo, una tarea que requiere un nuevo diseño de los sistemas pero que haría posible descifrar de manera rápida y barata la genética de un organismo complejo, diagnosticar y también administrar medicamentos a través de nanosistemas encapsulados, con la contribución que ello supondría para la medicina preventiva.

Antes de terminar, volveremos a la cuestión de cómo están afectando a la sociedad los avances en ciencia e ingeniería y, específicamente, en nanotecnología. La conclusión a que llegamos es que los problemas tienen que ver sobre todo con el empeño de individuos e instituciones por «triunfar». En las ciencias de la vida ha habido una gran toma de conciencia por parte de la sociedad debida, entre otras razones, al protagonismo de las compañías farmacéuticas y a la relativa facilidad con que se

6

Véase F. Dysson, «The Future Needs Us!», en *New York Review of Books*, vol. 50, n.º 2, del 13 de febrero de 2003.

El comportamiento emergente, es decir, el comportamiento impredecible, aparece en sistemas complejos, a saber, en aquellos con un gran número de elementos en interacción. La conducta de masas es un ejemplo de ello y constituye un tema apropiado de debate y reflexión acerca de creaciones del hombre susceptibles de cobrar vida propia. Sin embargo, un ejemplo de esto inspirado en la nanotecnología y que atrajo considerable atención pública, el libro de Michael Crichton, *Presa*, está basado en un supuesto científico erróneo. Es especialmente poderosa la descripción que hace el novelista de ejércitos de nanorrobots que colonizan a seres humanos y a su entorno, que son capaces de volar y nadar a gran velocidad a la manera de insectos u otros organismos similares de mayor tamaño. Esto no es posible porque la fuerza de resistencia viscosa sobre el área de superficie aumentada ralentiza los objetos a nanoescala. Es como si un ser humano tratara de nadar en melaza.

7

R. McGinn, «Ethics and Nanotechnology: Views of Nanotechnology Researchers», *Nanoethics*, vol. II, n.º. 2, 2008.

8

Ver <http://pubs.acs.org/cen/news/86/i15/8615news1/html>. El impacto de los residuos de nitrógeno y fósforo procedentes del uso a gran escala de fertilizantes puede apreciarse en la mayor parte del mundo occidental. En el oriental, los problemas de las zonas más desfavorecidas son la desaparición de la capa freática (y su sustitución con agua de mar en las zonas costeras) y la perforación de pozos cada vez más profundos que alcanzan la capa contaminada de arsénico, como ocurre en Bengala occidental, en India, y en Bangladesh. Este agotamiento masivo de los recursos de agua fue consecuencia de la generalización del uso del motor diesel y eléctrico, un invento de dos siglos de antigüedad pero que llegó al Tercer Mundo recientemente.

producen calamidades (pensemos en el ántrax, el Vioxx, el tabaco o la tалиamida). Los científicos que trabajan en los campos de la física y la ingeniería necesitan desarrollar nuevos enfoques de manera que los procesos de investigación y el desarrollo continúen siendo éticos y tengan el bienestar de la sociedad como fin último.

La investigación a nanoescala, debido a su gran potencial, sobre todo en los ámbitos de la salud y el medioambiente, requiere ser conducida de acuerdo a determinados principios éticos y puesta en práctica de manera responsable. Es aquí donde surgen algunos conflictos potenciales.

El bajo coste de conectarse para intercambiar información, la gran cantidad de información almacenada y la inclinación natural de los individuos y de los Estados a fisgonear constituyen una pesadilla potencial que se ha intensificado en los últimos años tanto en Occidente como en Oriente. La nanotecnología refuerza esta capacidad potencial. ¿Cómo deben la sociedad y la investigación resolver este problema?

La humanidad es la primera creación resultado de la evolución capaz de transformar la ley de la supervivencia del más fuerte. ¿Cuál es la relación entre el hombre y la naturaleza? ¿Deberíamos reconocer y aceptar la supremacía de la naturaleza? ¿Es éticamente aceptable o responsable alterar, reconstruir incluso, organismos naturales? Cuando reemplazamos o aumentamos partes de organismos vivos, ¿dónde está el límite entre el ser humano y la máquina? No pasará mucho tiempo antes de que sensores neurales nos desvelen los secretos de las emociones humanas, de la personalidad e incluso tal vez de la conciencia. En los tribunales de la India ya se empieza a aceptar la resonancia magnética como indicio de honestidad o fraude. En el laboratorio, se han aplicado actuadores de impulsos neuronales a monos de laboratorio, estimulándoles electrónicamente a que pelen un plátano. Los debates Joy-Dysson<sup>6</sup> se centraron precisamente en los miedos que suscita la potencial llegada de esta nueva tecnología antes de que la sociedad esté preparada para manejarla de manera segura y ecuánime.

¿Debería interrumpirse entonces la investigación relacionada con la nanotecnología debido a estas cuestiones controvertidas o a los desastres potenciales que podría acarrear, tal como han sugerido algunos? Nuestra opinión es que todos los puntos conflictivos deben ser identificados y cuidadosamente considerados. Pero ello no debe impedir que prosigan la investigación y el desarrollo, que deberán, no obstante, tener siempre la práctica responsable como lema principal. Igualmente importante es proporcionar oportunidades para los que trabajarán en este campo en el futuro y que hoy todavía son estudiantes, de manera que puedan reflexionar sobre su labor en el contexto de la sociedad en que se desarrolla y perfila.

La importancia de la seguridad en la manipulación y el uso de nanomateriales, dados los riesgos potenciales debidos a las propiedades reactivas de la nanoescala, se

ha puesto de manifiesto en un estudio reciente conducido entre investigadores de este campo.<sup>7</sup> Las prácticas seguras están relacionadas con la cultura dentro del laboratorio y en una comunidad en general. Consideraciones de tiempo, dinero, estatus y competencia pueden inducir a investigadores y gerentes a rebajar sus exigencias. Históricamente en casi todas las áreas los gobiernos han hecho lo mínimo en lo referente a seguridad hasta que las circunstancias les han obligado. La regulación de seguridad ha sido la asignatura pendiente en la minería, las fábricas textiles, de neumáticos, asbestos, glicol y otros agentes químicos de la industria de los semiconductores, así como el plomo en la pintura y la gasolina. Aún seguimos debatiendo el posible papel de los teléfonos móviles en el aumento de la incidencia de tumores cerebrales debido a las interacciones electromagnéticas, casi una década después de que su uso se haya generalizado. Muchos que desempeñan puestos de responsabilidad siguen sin reconocer la responsabilidad de los seres humanos y de las emisiones de gases de efecto invernadero en el calentamiento global. Aunque es muy probable que la nanotecnología llegue a ser una importante herramienta para prevenir la contaminación, por ejemplo, facilitando la retirada de arsénico y la limpieza de las aguas, los nanomateriales también son potencialmente contaminantes. La plata se emplea como agente antibacteriano en la industria farmacéutica (en tiritas, etcétera) y también en la lucha contra los microbios. ¿Qué proporción del material empleado está penetrando el flujo de agua?<sup>8</sup> Dadas las grandes cantidades de dinero que se están invirtiendo en desarrollo, las presiones para que se aprueben medidas reguladoras del medioambiente sin la investigación científica previa necesaria serán intensas. Aunque estos riesgos son el resultado de la ausencia de procedimientos y procesos sociales adecuados y no de la nanotecnología per se, los investigadores de este campo deberán tenerlos en cuenta.

Porque tratar de prevenir el daño mientras llevan a cabo su empresa científica es una responsabilidad ética fundamental de los científicos e ingenieros. Más allá de fomentar la seguridad en el laboratorio, preservar la integridad de los datos manejados, reconocer debidamente las contribuciones y respetar los derechos de propiedad intelectual, ¿tiene el investigador responsabilidades sobre las consecuencias sociales de su investigación? Las bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki durante la Segunda Guerra Mundial inauguraron un largo periodo de introspección y de compromiso público de los científicos con el debate social,<sup>9</sup> porque ¿cómo se controla al genio una vez ha salido de la botella? De acuerdo a la visión más tradicional, la sociedad en general y no el investigador individual, es moralmente responsable de lo que se hace con conocimiento público. Sin embargo, el investigador individual con conocimiento de causa también tiene parte de responsabilidad. Los investigadores no siempre pueden declararse ignorantes de los riesgos que suponen las potentes

## 9

La ciencia y los científicos rara vez sirven de inspiración al arte. *Doctor Atómico*, una ópera popular estrenada en 2005, estaba inspirada en el proyecto Manhattan, donde se hizo realidad la bomba atómica. Los principales científicos del país entonces, capitaneados por Robert Oppenheimer, debatían acerca de la bomba mientras trabajaban sin pausa en lo que Oppenheimer, personaje central de la obra, llamó después del ensayo y citando a Bhagwat Heeta: «Soy la Muerte, el destructor de mundos». Es interesante señalar que en los bombardeos de la Segunda Guerra Mundial murieron muchas más personas inocentes que con la bomba atómica. Más tarde, en guerras abiertas y encubiertas, el Agente Naranja, el uranio empobrecido, las bombas de racimo y las minas antipersona han sembrado igualmente la muerte sin desencadenar una reacción similar en la opinión pública, probablemente a causa de que sus efectos perniciosos son más espaciados en el tiempo.

«máquinas» que crean. Los investigadores contemporáneos desarrollan y facilitan la difusión de sus creaciones dentro de sociedades que conocen. Aunque no siempre se puede predecir que determinados frutos de la investigación resulten en aplicaciones éticamente dudosas, en algunos casos sí es posible, por ejemplo, cuando están en juego sustanciosos beneficios potenciales militares y económicos. Por tanto, si un investigador tiene razones para sospechar que su trabajo pueda ser puesto en práctica en la sociedad con riesgo para los seres humanos tiene el deber moral de alertar a las autoridades pertinentes o al público.

Los ejemplos expuestos y la breve discusión sobre la cuestión de las responsabilidades ponen de manifiesto las dificultades surgidas cuando los avances científicos con implicaciones sociales de magnitud se producen con rapidez, y la sociedad se ve obligada a encontrar el equilibrio entre fomentar la investigación y el desarrollo productivos y defender un marco regulatorio que garantice la seguridad. Una posible respuesta a este desafío es que, en los

últimos años, la presión de la opinión pública ha servido para que el científico desarrolle una doble faceta: la de virtuoso técnico y detector de las implicaciones éticas de su trabajo. En palabras de Samuel Johnson, «la integridad sin conocimiento es débil y carece de utilidad, y el conocimiento sin integridad es peligroso y terrible».

Para los científicos e ingenieros, uno de los placeres de su disciplina es que la gran ciencia siempre es fuente de júbilo, de satisfacción emocional por el hecho de haber descubierto una porción de verdad que pueden considerar como propia. La ingeniería creativa proporciona el placer de combinar el descubrimiento científico con la alegría de haber hecho una aportación positiva a la humanidad. En su máxima representación, estas empresas encarnan los ideales de la vida civilizada, la búsqueda de la verdad y la práctica de la ciudadanía responsable. La nanotecnología forma parte de esta tradición clásica; está aquí, crece poderosamente y, convenientemente administrada, impulsará a la sociedad hacia adelante de muchas y provechosas maneras.