

NANOTECNOLOGÍA: LA REVOLUCIÓN DE LO DIMINUTO

Pedro A. Serena Domingo

La nanotecnología se ha afianzado, en este comienzo del siglo XXI, como una herramienta transversal y facilitadora que paulatinamente irá modificando los métodos de fabricación, incorporándose en materiales, dispositivos y productos de manera imperceptible y ubicua. Este artículo repasa el camino recorrido desde los laboratorios a las fábricas y de estas a los supermercados, indicando también parte del que queda por transitar para que esta revolución de lo diminuto se consolide.

LOS PAISAJES DEL NANOMUNDO

El prefijo «nano» (del griego *nanós*, «enano») se emplea en el ámbito de la ciencia y la tecnología para referirse a una cantidad equivalente a la milmillonésima parte de algo. Cuando aplicamos este prefijo a una unidad de medida de longitud como el metro, nos encontramos con el nanómetro (abreviado nm). Se trata de una longitud extremadamente pequeña, en la que solo se pueden alinear unos cuantos átomos. Recordemos que los átomos son las unidades

fundamentales de la materia y que se enlazan entre sí para formar todo tipo de moléculas, que a su vez se ensamblan dando lugar a entidades mucho más complejas que configuran nuestros propios organismos y todo el mundo que nos rodea. Cuando estudiamos la materia a escala nanométrica, nos adentramos en un nuevo universo al que solemos denominar nanoescala o nanomundo, habitado por diferentes entidades a las que denominamos de un manera genérica «nanoobjetos». Átomos, moléculas, nanohilos y nanopartículas de formas y composiciones diversas, fullerenos, nanotubos de carbono, láminas de grafeno, cadenas de ADN, membranas celulares, proteínas, ribosomas, liposomas, micelas, dendritas o virus son ejemplos, de diferente complejidad, de los nanoobjetos que forman el nanomundo. Algunos nos resultan familiares pero hay otros, que se describirán más adelante, que no lo son tanto. En algunas ocasiones los nanoobjetos aparecen aislados pero en otras se combinan entre sí para formar nanoestructuras o nanomateriales, o se integran en sistemas de mayor complejidad.

En los laboratorios de centros de investigación y universidades se intenta comprender cómo todas estas entidades se forman y se combinan, qué propiedades poseen, y cómo estas propiedades dependen de la forma, el tamaño y la composición de cada nanoobjeto o nanomaterial. Por lo general, las propiedades de la materia cuando esta aparece en formato nanométrico pueden llegar a ser muy diferentes de aquellas que manifiesta cuando se presenta en el mucho más familiar formato macroscópico. Hablamos de «efectos de tamaño» para referirnos a aquellos efectos que se ponen de manifiesto cuando el tamaño de los objetos cambia.

Por ejemplo, la solubilidad o la reactividad de un material crece si lo dividimos en trozos más pequeños haciendo que aumente su superficie efectiva. Los efectos de tamaño también se manifiestan cuando se disminuye el tamaño de una unidad de almacenamiento (bit) o de una unidad de procesado (transistor) de la información consiguiendo aumentos de la capacidad de las memorias y los procesadores integrados en los dispositivos electrónicos que nos rodean. Otros efectos de tamaño son más llamativos. Por ejemplo, las nanopartículas de ciertos materiales semiconductores pueden emitir luz con una coloración que depende de su diámetro. La explicación de esta dependencia entre el color y el tamaño solo se puede hacer en el marco de la poco intuitiva teoría de la mecánica cuántica. Esta teoría, que ha sido puesta a prueba en incontables ocasiones, representa el marco conceptual que explica la estructura de átomos y moléculas, y cómo se enlazan para construir las impresionantes arquitecturas que observamos en la naturaleza o en los dispositivos que el hombre fabrica. Todos los ejemplos mostrados anteriormente sirven para enfatizar que lo «nano» es diferente, siendo precisamente esta diferencia la que hace que los nanoobjetos sean interesantes por sí mismos o por sus posibles aplicaciones.

Tampoco hay que olvidar la gran conexión que existe entre la nanotecnología y la biología. El conocimiento de todo lo que sucede en el interior de una célula, entidad formada por nanoestructuras y nanomáquinas biológicas coordinadas entre sí mediante reacciones bioquímicas, es una impresionante fuente de inspiración para el diseño de futuros materiales y dispositivos. Además, la naturaleza proporciona ejemplos

de nanoestructuras sintetizadas biológicamente que constituyen una inagotable fuente de inspiración. Ejemplos de estas nanoestructuras biológicas los encontramos en las alas de algunas mariposas (lo que hace que exhiban llamativos tonos metalizados) o en las flores de loto (que evitan la proliferación de bacterias gracias a su carácter hidrofóbico).

El conjunto de saberes de todo tipo que acumulamos y usamos para entender cómo funciona este fascinante nanomundo se denomina nanociencia, disciplina de la que mucho se ha escrito^{1,2}. Un aspecto propio de la nanociencia es su carácter multidisciplinar, ya que en ella convergen otras más tradicionales como la física, la química, la biología, la medicina y la ingeniería. Sin duda alguna, este «mestizaje» científico-tecnológico es un caldo de cultivo de ideas y propuestas. Cuando el conocimiento de la nanociencia se convierte en un conocimiento aplicado capaz de mejorar nuestras condiciones de vida hablamos de nanotecnología. Para ser más precisos sobre los límites de trabajo de la nanociencia y la nanotecnología, existe un acuerdo general que establece que los objetos de interés para estas disciplinas son aquellos con tamaños (en alguna de sus tres dimensiones) comprendidos entre unas décimas de nanómetro (las dimensiones típicas de los átomos) y los cien nanómetros.

Parece claro que el objetivo de la nanotecnología es conseguir materiales y dispositivos con propiedades a «medida», sacando provecho de los efectos de tamaño. Además estos materiales y dispositivos deberán fabricarse en cantidades masivas para llegar a toda la sociedad, con los menores costes económicos y, por supuesto, con el menor daño posible para nuestra salud y para el medioambiente. Se trata de un

formidable reto que en caso de ser superado tendrá grandes consecuencias económico-sociales. Conseguir la fabricación en gran escala de nanomateriales y nanodispositivos se logrará mediante la adecuada combinación de diferentes técnicas. Por un lado, se utilizan aquellas que proceden de la biología y la química, las denominadas técnicas «de abajo hacia arriba» (o *bottom-up* en inglés), basadas en el ensamblado de unidades pequeñas (átomos, moléculas sencillas) que interaccionan para dar lugar a estructuras más complejas. Por otro lado, la física y la ingeniería proporcionan técnicas de fabricación denominadas «de arriba hacia abajo» (o *top-down* en inglés), en las que se adquiere el control sobre el tamaño y forma de los objetos nanométricos a base de cincelar la naturaleza con haces de electrones, de iones, etc.

El arsenal de herramientas y técnicas que se han desarrollado para caracterizar y fabricar nanoobjetos y nanomateriales es impresionante. Esta acumulación de conocimientos no se ha producido de forma instantánea. El control de la materia a escala nanométrica comenzó hace mucho tiempo y se pueden poner innumerables ejemplos sobre cómo nuestros antepasados fabricaron a lo largo de los últimos tres mil años utensilios con fascinantes propiedades conferidas por nanomateriales sintetizados inicialmente por azar, que luego serían perfeccionados mediante métodos celosamente guardadas por diversos gremios. Este control, sin embargo, no era tal porque en realidad no se conocían los fundamentos que sostuviesen las metodologías empleadas. Sin embargo, cuando en el siglo XIX se consolida la visión atomística de la materia con la construcción de la tabla periódica de los elementos, comienza una carrera por

entender cómo funciona la naturaleza a escalas más y más pequeñas. En cierto modo, a la vista de lo sucedido desde entonces, quizás la nanociencia y la nanotecnología eran una meta inevitable para la humanidad, una vez que esta hubiese conquistado el micromundo a lo largo del siglo xx.

Como ocurre con las grandes aventuras científico-tecnológicas, han sido muchos los investigadores que han contribuido al conocimiento del nanomundo, pero siempre sobresalen algunas figuras que destacan por su visión o sus aportaciones. Quizás la más importante de ellas sea el físico estadounidense R. Feynman quien, a finales de la década de 1950 en una conferencia ante la Sociedad Americana de Física, realizó una serie de predicciones que se han ido cumpliendo con el paso del tiempo. En particular R. Feynman predijo que los seres humanos algún día observarían y manipularían átomos gracias a sofisticadas máquinas y que esta capacidad sería la semilla para alcanzar inimaginables avances en electrónica y medicina. Otros protagonistas de esta aventura han sido: J. R. Arthur y A. Y. Cho, quienes desarrollaron el método de crecimiento de materiales mediante epitaxia de haces moleculares (conocido como MBE, del inglés *Molecular Beam Epitaxy*) con el que se fabrican estructuras formadas con capas con un espesor de un solo átomo; el ingeniero N. Taniguchi, quien acuñó en los años 1970 el término nanotecnología; H. Rohrer y G. Binnig, quienes desarrollaron a principios de los años 1980 un instrumento denominado microscopio de efecto túnel (STM, del inglés *Scanning Tunneling Microscopy*) con el que se pudieron ver y mover átomos; H. Kroto, R. Curl y R. Smalley, quienes descubrieron en

1985 la molécula C60, conocida como «fullereno», una forma alótropa del carbono que se ha convertido en uno de los iconos de la nanociencia; K. E. Drexler, que publicó en 1986 su libro *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* en el que propuso el uso de sistemas robotizados denominados «ensambladores universales» para crear estructuras de mayor complejidad; S. Iijima, quien descubrió en 1991 los nanotubos de carbono; A. K. Geim y K. S. Novoselov, quienes trece años después descubrieron el grafeno, material de moda en la actualidad... Esta lista, algunos de cuyos integrantes fueron galardonados con el Premio Nobel en Física o en Química, sirve para ilustrar que la historia del interés por conocer y controlar el nanomundo no es tan reciente.

DEL LABORATORIO AL MERCADO

Una cosa es controlar el nanomundo en un laboratorio, durante un proceso de investigación, y otra hacerlo con el fin de conseguir la producción en masa de materiales y dispositivos. Este salto desde la nanociencia del laboratorio a la nanotecnología que encontraremos en el supermercado no es un asunto trivial. Sin embargo, en las últimas cuatro décadas muchos nanomateriales y técnicas propias de la nanofabricación se han ido incorporando a diferentes sectores de la producción. En los laboratorios continuamente se proponen procesos de fabricación, unos de tipo *top-down* y otros *bottom-up*, o combinaciones de ambas estrategias, pero una gran parte son descartados como sistemas de producción en masa. Solo los métodos más eficientes, que puedan ser económicamente viables sin olvidar aspec-

tos como la eficiencia energética o el impacto medioambiental, son los que llegarán a las plantas de producción.

Un aspecto importante de la nanotecnología es su carácter transversal, lo que hace que tenga impacto en prácticamente todos los sectores económicos. Se suele decir que la nanotecnología es invisible a la vez que ubicua. Este enorme potencial de generación de riqueza en múltiples campos fue el gran argumento usado por la administración de los Estados Unidos, durante la presidencia de William «Bill» Clinton, para poner en marcha la Iniciativa Nacional en Nanotecnología (NNI, *National Nanotechnology Initiative*). Desde su lanzamiento en el año 2000, el Gobierno Federal de Estados Unidos ha invertido del orden de 23.000 millones de dólares en proyectos, equipamientos, centros de investigación, etc. Tras la implantación de esta iniciativa, otros países o entidades supranacionales, como la Unión Europea, siguieron un camino similar. El resultado ha sido una verdadera carrera en la que las inversiones globales se dispararon. España no se quedó atrás, aunque la actual crisis ha ralentizado el desarrollo de la nanotecnología³. Como fruto de estas ingentes inversiones se publicaron innumerables artículos, que reflejan el saber básico, y patentes, que indican el potencial de aplicación. Para cuantificar el impacto de las investigaciones en nanociencia y nanotecnología, se puede mencionar que en el año 2015 se publicaron más de 140.000 artículos de investigación y se registraron casi 8.500 patentes relacionados con la nanotecnología. Los cinco países que lideran la producción científica son China, Estados Unidos, India, Corea del Sur y Alemania. España ocupa actualmente la undécima posición. En cuanto a las

patentes, los países que lideran el registro de este tipo de documentos en la Oficina de Patentes de los Estados Unidos son Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, Taiwán y China. En dicha clasificación España aparece en decimonovena posición. Se puede destacar que el CSIC es la entidad española que más artículos y patentes internacionales tiene en este campo del conocimiento⁴.

El gran número de patentes relacionadas con la nanotecnología pone de manifiesto el interés por proteger un conocimiento que se encuentra detrás de muchos productos que ya encontramos en los anaqueles de los supermercados o en los catálogos comerciales que se publicitan en Internet. El instituto Wilson Research Centre puso en marcha hace diez años el proyecto PEN (*Project on Emerging Nanotechnologies*) que ha permitido catalogar más de 1.800 productos comercializados en Estados Unidos. En la actualidad el mayor inventario mundial de productos se gestiona desde Irán (*Nanotechnology Products Database*) dando cuenta de más de 7.300 productos. Sea cual sea la fuente de información sobre los productos que contienen nanomateriales o nanodispositivos, es evidente que la nanotecnología se está incorporando a nuestras vidas a buen ritmo, pero de manera silenciosa.

Poner ejemplos de productos que contienen nanomateriales o nanodispositivos no es una tarea fácil porque hay muchísimos entre los que escoger, como puede comprobarse visitando alguna de las bases de datos mencionadas anteriormente. Se puede medir el impacto de la nanotecnología de otra forma, acudiendo a la página web del gigante del comercio mundial, Alibaba. Si se realiza la búsqueda

de términos como «*nanoparticle*» o «*carbon nanotubes*» se obtienen más de 7.500 productos ofertados por varios cientos de proveedores. En algunos casos hay empresas que únicamente atienden pedidos mínimos de varios cientos de kilogramos. Es evidente que estas grandes cantidades se están vendiendo porque se incorporan en otros productos que, a su vez, otras empresas comercializan. Ordenadores, teléfonos móviles, sistemas de iluminación LED, televisiones planas, vehículos, aviones, cosméticos, fármacos, alimentos, envases, productos textiles, materiales de construcción, cementos, pinturas, sistemas de depuración y filtración de agua, aerogeneradores, baterías, etc., ya se están beneficiando de las aportaciones de la nanotecnología. Tras la electrónica, el sector que está experimentando un mayor crecimiento es el de la nanomedicina (el uso médico de nanomateriales y nanodispositivos). A los hospitales comienzan a llegar nuevos kits de diagnóstico, fármacos contra el cáncer y otras enfermedades, implantes inteligentes, sistemas para la regeneración de tejidos, secuenciadores genéticos de altas prestaciones, etc., con aportaciones importantes de la nanotecnología. Por ejemplo, en 2014 ya se comercializaban más de medio centenar de fármacos basados en sistemas nanométricos de distinto tipo, capaces de transportar y liberar el principio activo de forma más controlada y eficaz. En estos momentos varios cientos de formulaciones de nanofármacos están en fase de estudio, por lo que parece que tendremos que acostumbrarnos a oír hablar de la nanomedicina.

No se debe dejar de mencionar que la defensa y la seguridad son sectores en los que la nanotecnología también

tiene gran impacto, mostrando su doble uso, civil y militar, al igual que ha ocurrido con la gran mayoría de las tecnologías desarrolladas por los seres humanos. Por ejemplo, la NNI de Estados Unidos destina más del 15% de sus inversiones al Departamento de Defensa. Sin embargo es prácticamente imposible acceder a la relación de equipos militares que contienen desarrollos nanotecnológicos ya que esta información suele ser confidencial.

CONVERGENCIA PARA LA SOSTENIBILIDAD

Parece evidente que en estos momentos la nanociencia y la nanotecnología se están consolidando a la vez que confluyen con otras disciplinas científico-tecnológicas que también tienen carácter transversal: la biotecnología y las tecnologías de la información (TIC). A su vez los descubrimientos en las ciencias cognitivas y neurociencias van a sucederse a buen ritmo en las próximas décadas gracias a la puesta en marcha de varios megaproyectos en la Unión Europea, Estados Unidos y Japón. Los expertos advierten que nos encaminamos hacia una convergencia de la nanotecnología, la biotecnología, las ciencias de la información y las ciencias del conocimiento, en lo que se denomina convergencia NBIC (de Nano, Bio, Info y Cogno). Siguiendo la teoría de J. A. Schumpeter, esta convergencia tecnológica generará una oleada de innovaciones que impulsará profundos cambios en la economía, por lo que es muy difícil saber cómo será nuestro mundo dentro de treinta o cuarenta años. Si bien es cierto que hay un reducido número de países que controlan las sofisticadas nanotecnologías aplicadas a la electrónica o la medicina, hay otros desarrollos nanotecn-

lógicos que son accesibles a países con economías menos avanzadas por lo que pueden contribuir a resolver problemas como la malnutrición, el déficit de asistencia sanitaria, el acceso al agua potable, la pobreza energética, la contaminación atmosférica, de ríos y de suelos, etc.⁵ Desde esta perspectiva la nanotecnología tiene reservado cierto protagonismo en la consecución de parte de los diecisiete objetivos del desarrollo sostenible que ha marcado la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

BENEFICIOS FRENTE A RIESGOS: EL PAPEL DE LA GOBERNANZA

Hasta ahora se ha dado una visión optimista de la nanotecnología, pero cualquier tecnología tiene aspectos negativos, que generan controversia, alarma y temor⁶. El automóvil, que facilita libertad de movimiento, causa cientos de miles de víctimas cada año. La química aporta infinidad de productos y materiales de uso cotidiano pero también se han producido importantes accidentes en plantas químicas causando intoxicaciones por emisiones de gases. Estos ejemplos de la dualidad beneficio-riesgo nos alertan sobre la necesidad de tener una actitud crítica, capaz de valorar los aspectos positivos y prevenir los negativos, ante la llegada de cualquier tecnología. La nanotecnología no es una excepción y ya existen decenas de informes que alertan del uso de nanopartículas en alimentación, cosmética o medicina, del uso de nanodispositivos que pueden invadir la intimidad de las personas, del posible aumento de la desigualdad social por el acceso privilegiado de una parte de la sociedad a los avances de la

nanomedicina, etc. Incluso hay visionarios que se arriesgan a predecir la modificación de nuestra especie, creando superhombres inmortales, o que anuncian la extinción de la humanidad por causa de temidos nanorrobots. Hay que poner los pies en la tierra. Los riesgos más probables y por tanto más reales están relacionados con la posible toxicidad, tanto para los seres humanos como para el resto de los seres vivos, de algunos de los nanomateriales que se comienzan a comercializar a gran escala. Estos riesgos, cuyo inadecuado tratamiento puede generar alarma y por lo tanto retrasar la incorporación de nanocomponentes en productos de consumo masivo, se están abordando mediante la implantación de ciertas estrategias que incluyen la aplicación del principio de precaución, la puesta en marcha de programas de investigación sobre los efectos tóxicos de los nanomateriales, la elaboración de normativa y legislación sobre la fabricación, etiquetado, almacenamiento, transporte, uso y reciclado de nanomateriales, la vigilancia del cumplimiento de estas normas, etc.

Además de estudios y regulaciones, hay otros aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de implementar de manera segura la nanotecnología en los productos y servicios. Estos aspectos tienen que ver con el acceso transparente a una información veraz y contrastada, la educación en contextos formales e informales, la participación de la ciudadanía en la toma de decisiones relacionadas con la política científica-tecnológica, etc. Todos estos elementos son de capital importancia dado el gran desconocimiento que la sociedad tiene sobre esta disciplina y sus implicaciones⁷. La forma en la que la nanotecnología, junto con las otras tecnologías transversales que forman la convergencia NBIC,

se incorporará en nuestra sociedad requiere el desarrollo de esquemas específicos de gobernanza⁸. Sin una gobernanza adecuada, basada en el conocimiento y el sentido común para efectuar el balance de los beneficios y los riesgos, que esté fundamentada en la transparencia y la participación, es posible que todas las esperanzas puestas en el control del nanomundo queden reducidas a unas pocas aplicaciones en sectores concretos y que la nanorrevolución que muchos auguraban (y que tanto esfuerzo intelectual ha requerido) quede aparcada en algún rincón de nuestra historia. Sin embargo, hoy por hoy, el tratamiento de todos estos asuntos está en nuestras manos de forma que si se toman las decisiones adecuadas es probable que podamos saborear los frutos del nanomundo de una forma placentera y segura. ■

NOTAS

- ¹ Serena, P. A. (2010): *Nanotecnología*, CSIC y La Catarata, Madrid.
- ² Martín Gago, J. A., et al. (2014): *El nanomundo en tus manos: Las claves de la nanociencia y la nanotecnología*, Crítica, Madrid.
- ³ Serena, P. A. (2009): «La implantación de la nanotecnología en España: muchas luces y alguna sombra», *Mundo Nano* 2(2):74-90. En www.mundonano.unam.mx.
- ⁴ Maira, J., et al. (2015): «La transferencia de Nanotecnología en el CSIC», *Acta Científica y Tecnológica* 25:8-12. En http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/revistas/Revista_aec25.pdf.
- ⁵ Salamanca-Buentello, F., et al. (2005): «Nanotechnology and the Developing World» en *PLoS Medicine* 2:300-303.
- ⁶ Bermejo, M., y Serena, P. A. (2017): *Los riesgos de la nanotecnología*, CSIC y La Catarata, Madrid.
- ⁷ Gómez Ferri, J. (2012): «La comprensión pública de la nanotecnología en España», *Revista CTS* 20(7):177-207.
- ⁸ Echevarría, J. (2005): «Gobernanza de las nanotecnologías» en *Arbor* 715:301-315.