

LA NANOTECNOLOGÍA, UNA REVOLUCIÓN DESCONOCIDA

Pedro A. Serena Domingo

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

RESUMEN

La nanotecnología, gracias a la explotación de su carácter multidisciplinar, de su capacidad para sintonizar las propiedades de la materia a través de los denominados efectos de tamaño, y de la adecuada combinación de diversas técnicas de fabricación, proporciona nuevos productos y aplicaciones en prácticamente todos los sectores económicos. Esta versatilidad ha hecho que la nanotecnología sea destino de inmensas inversiones que están dando lugar a un mercado emergente. En paralelo con este desarrollo, se han puesto de manifiesto ciertas inquietudes relacionadas con los posibles riesgos de la nanotecnología. La respuesta de la mayor parte de los países ha sido similar, poniendo en marcha programas para evaluar el impacto de la nanotecnología, estableciendo las normativas adecuadas, y mejorando los procesos de comunicación con la sociedad. En el caso de España, la respuesta ha sido diferente, ya que no se han diseñado iniciativas para involucrar a la población en el debate de las nanotecnologías.

1. LA NANOTECNOLOGÍA: DE LA INFANCIA A LA MADUREZ

La nanociencia y la nanotecnología han tenido un desarrollo relativamente lento hasta mediados de los años 90, y a lo largo de los últimos veinte años es cuando se han situado en la vanguardia del conocimiento y han comenzado a tener un espacio reconocido dentro de la actividad científica. La nanociencia busca comprender el comportamiento de la materia en la denominada “nanoescala”, intervalo de tamaños arbitrariamente definido entre un nanómetro y unos pocos cientos de nanómetros. Por su parte, la nanotecnología tiene como principal objetivo transformar estos conocimientos en nuevos productos y aplicaciones. Átomos, moléculas, proteínas, virus, cadenas de ácido desoxirribonucleico (ADN), nanotubos de carbono, nanopartículas, monocapas autoensambladas, láminas de grafeno, nanohilos, anticuerpos, membranas celulares, liposomas, etc. son las entidades o “nanoobjetos” que son materia de estudio y aprovechamiento por parte de la nanociencia y la nanotecnología, respectivamente. Sin duda, el término “nanotecnología” es el que más difusión ha tenido y ha acabado incluyendo tanto aspectos fundamentales como aplicados.

El término “nanotecnología” ya está cerca de cumplir 40 años desde que fuese acuñado por N. Taniguchi en 1974 y ha transcurrido más de medio siglo desde que R. Feynman anticipase nuestra capacidad actual para entender y dominar la materia a nivel atómico y molecular. Desde entonces se han ido sucediendo diferentes hitos que han ido dando forma a la nanotecnología tal y como la conocemos ahora. En las últimas dos décadas, los denominados microscopios de proximidad (SPM, del inglés *Scanning Probe Microscopy*), que surgen a partir de la invención del microscopio de efecto túnel (STM, del inglés *Scanning Tunnelling Microscopy*) por H. Rohrer y G. Binnig, galardonados con el Premio Nobel de Física en 1986, se han convertido en herramientas habituales para observar, caracterizar, manipular y mover diferentes nanoobjetos.

En este periodo de tiempo también fueron descubiertos los fullerenos por R. Smalley, R. Curl y H. Kroto, quienes recibieron el Premio Nobel de Química en 1996, los nanotubos de carbono por S. Iijima en 1991, o el grafeno por A. K. Geim y K. S. Novoselov, galardonados con el Premio Nobel de Física de 2010. La búsqueda de lo extremadamente pequeño también se ha visto reflejada en sectores productivos como el de la microelectrónica, cuyas tecnologías han ido satisfaciendo las predicciones

de la denominada Ley de Moore y han logrado que los procesadores que utilizamos estén formados con elementos nanométricos. Aunque ha habido muchas más contribuciones de gran relevancia, las mostradas anteriormente sirven para ilustrar el largo recorrido que la nanotecnología ha efectuado hasta nuestros días. Se puede decir que a principios de los años 2000, la nanotecnología entró en una etapa de madurez en la que ahora sigue evolucionando.

2. EL NANOMUNDO, ESCENARIO MULTIDISCIPLINAR Y VERSÁTIL

Una de las principales características de la nanotecnología es su carácter multidisciplinar, pues el nanomundo puede visualizarse como un gran escenario donde convergen las actividades de químicos, biólogos, físicos, médicos e ingenieros. Para todos ellos la base de su conocimiento se deriva en última instancia de los átomos y moléculas que forman todo lo que nos rodea. Gracias a esta convergencia se generan insospechadas propuestas que proporcionan nuevas soluciones a problemas planteados en un gran número de sectores de aplicación (Serena 2010, Acharya 2011). La nanotecnología se convierte en un punto de encuentro de especialistas procedentes de disciplinas tradicionales que aportan diferentes aproximaciones conceptuales, formalismos, jergas, y técnicas de caracterización, así como diferentes perspectivas en la posible aplicación de los descubrimientos generados. Es evidente que la nanotecnología es un enriquecedor espacio que requiere actuar con una mentalidad abierta, dispuesta al intercambio de conceptos y metodologías.

Además de su carácter multidisciplinar, la nanotecnología posee ciertas ventajas que le permiten ofrecer algo diferente con respecto a las tecnologías que se desarrollan en la macro o microescala. La principal de estas ventajas está relacionada con la posibilidad de controlar ciertas propiedades de los nanoobjetos mediante el control de su tamaño y forma. En primer lugar nos encontramos los denominados efectos clásicos de tamaño, que se producen cuando los materiales presentan propiedades nuevas a medida que su tamaño decrece, debido al aumento de la relación superficie/volumen. Por ejemplo, los materiales son más solubles o más reactivos si su presentación se hace usando formatos de pequeño tamaño (pulverizados, micronizados, etc.).

Otro ejemplo de efecto clásico de tamaño nos lo encontramos en la miniaturización de los circuitos: a medida que el tamaño de un elemento o componente de un circuito se reduce menos tiempo tarda una señal en recorrerlo. Sin embargo los efectos de tamaño más interesantes proceden de las propiedades cuánticas que rigen el comportamiento de la materia, que emergen con mucha fuerza cuando el tamaño de los objetos se reduce considerablemente. Estos efectos cuánticos de tamaño permiten modificar (o sintonizar) las propiedades de los materiales dentro un amplio rango de valores, logrando que los materiales o los dispositivos sean más versátiles y posean un mayor valor añadido desde el punto de vista de su posible aplicación. Un ejemplo típico de efecto cuántico se encuentra en la dependencia de la coloración de una nanopartícula fabricada de material semiconductor con su tamaño.

Es evidente que la nanotecnología abre la puerta a nuevas aplicaciones procedentes del intercambio de ideas propio de los espacios multidisciplinarios y a las poderosas técnicas de fabricación y síntesis que se están desarrollando. A fecha de hoy se está aprendiendo a controlar la materia a escala atómica y molecular en muchos tipos de sustancias y materiales, pero todavía quedan muchos desarrollos por delante para mejorar ese control. Por otro lado la llegada de la nanotecnología a las fábricas requiere una etapa de maduración que permita superar muchos de los problemas que tiene su transferencia a una escala industrial y se deben desarrollar aún las tecnologías capaces de manipular y ensamblar miles de millones de nanoobjetos para obtener materiales o dispositivos capaces de llevar a cabo complejas funciones. Aunque queda mucho recorrido por delante, pero se sabe que la nanotecnología se incorporará a las industrias usando procesos de dos tipos, procesos “descendentes” o “top-down” (de arriba hacia abajo), en los que se parte de sistemas de gran tamaño para, mediante técnicas de molienda, ataque, corte, pulido, litografía, pirolisis, etc., conseguir sistemas con partes

nanométricas, y procesos “ascendentes” o “bottom-up” (de abajo hacia arriba), en los que a partir de pequeñas unidades (átomos, moléculas o diversas nanoestructuras) se ensamblan complejos sistemas capaces de realizar diversas funciones de una complejidad creciente.

Tampoco hay que olvidar que la nanotecnología tiene una gran aliada, la biología, puesto que la vida es una inagotable fuente de inspiración (“bioinspiración”). De la vida podemos aprender cómo funcionan diferentes procesos ascendentes, muchos de ellos basados en el reconocimiento y autoensamblado molecular, que permitirán desarrollar nuevos métodos de fabricación a gran escala. En cualquier caso, lo más probable es que en las fábricas del futuro se empleen combinaciones de estrategias de síntesis, ensamblado y fabricación tanto ascendentes como descendentes que consigan los resultados buscados al menor coste posible.

3. EL DECIDIDO APOYO A LA NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología propone revolucionarias soluciones en múltiples sectores, mediante el rediseño de los sistemas de producción y la obtención de nuevos materiales y dispositivos (Correia 2007). La nanotecnología se postula como una de las bases del nuevo modelo económico global y por esa razón durante los últimos quince años los gobiernos de los países más desarrollados han realizado una decidida apuesta para fomentar la investigación en esta disciplina (Delgado 2008). De esta forma se han puesto en marcha innumerables programas estratégicos que han permitido la inversión focalizada en proyectos de investigación y programas de formación, la construcción de nuevos centros e instalaciones, etc.

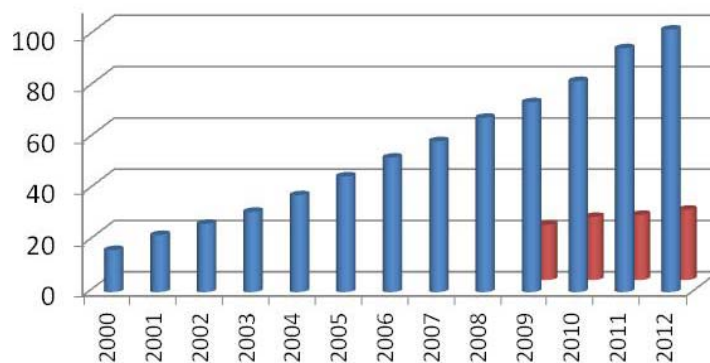
La Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI) de los EE.UU. fue la primera actuación de este tipo (NNI 2012, Klieke 2009) y ha sido el instrumento que ha logrado que dicho país tenga en la actualidad un reconocido liderazgo en este campo. Como ejemplo, basta mencionar que en el año 2014 el gobierno de EE.UU. invertirá más de 1.700 millones de dólares en nanotecnología. La iniciativa estadounidense fue imitada posteriormente, con mayor o menor profundidad, por muchos países u entidades supranacionales como la Unión Europea. En concreto, el próximo Programa Marco de la Unión Europea, Horizonte 2020 (H2020, 2013), consagra la nanotecnología como una de las seis líneas clave de la investigación para que Europa logre mantener una industria competitiva. Sin embargo, merece la pena destacar la irrupción de China tanto en el escenario económico como científico-tecnológico. Desde el año 2008 China lidera la producción de artículos de nanotecnología a nivel mundial y ocupa el segundo lugar en inversiones (Nano Statistics 2013). Todo parece indicar que es inevitable que a lo largo de la próxima década China supere a EE.UU. en inversión en nanotecnología. Como efecto de todas las iniciativas puestas en marcha se puede destacar el continuo incremento experimentado por las publicaciones científicas dedicadas a nanotecnología (más de 100.000 en 2012, ver Figura 1).

Si se exploran indicadores de perfil más tecnológico, como la producción de patentes relacionadas con la nanotecnología, se pone de manifiesto que EE.UU., Japón, Corea del Sur, Alemania, Taiwán y Francia, lideran, por ese orden, dicha producción (Nano Statistics 2013). En 2012 se registraron más de 28.000 patentes relacionadas con la nanotecnología en la Oficina de Patentes de los EE.UU. Estos datos indican que en estos países la inversión privada en nanotecnología, interesada por proteger los resultados y posibles beneficios de sus investigaciones, está superando la inversión efectuada desde el sector público. A su vez, la actividad de las empresas en el campo de la nanotecnología muestra la proximidad al mercado de algunos de los descubrimientos que se gestaron en los laboratorios hace algunos años.

La nanotecnología ya está generando un negocio considerable, que posiblemente llegue a alcanzar la astronómica cifra de más de dos billones de euros en 2015 en todo el mundo (Xue 2011). Es evidente que todas estas previsiones pueden modificarse debido a la actual crisis económica global, que ha ralentizado las inversiones tanto públicas como privadas, por lo que en estos momentos existe

cierta incertidumbre sobre el crecimiento del sector de la nanotecnología. También es cierto que los suculentos beneficios de las nanotecnologías estarán desigualmente repartidos, ya que seguramente serán para las empresas de aquellos países que actualmente lideran la investigación en nanociencia y nanotecnología y que están apostando por su transferencia al sector productivo (Delgado 2008).

Figura 1. Evolución durante el periodo 2000-2012 del número de artículos (en miles) internacionales (ISI) cuyo tema de estudio es la nanociencia o la nanotecnología. Desde 2009 se incluyen las patentes registradas en la Oficina de Patentes de los EE.UU.



Fuente: Nano Science, Technology and Industry Scoreboard (Nano Statistics 2013).

4. ESPAÑA: UN CAMINO DE IDA ¿Y VUELTA?

En el caso específico de España la nanotecnología se ha desarrollado siguiendo los mismos patrones que las demás ramas científico-técnicas, aunque este desarrollo se ha caracterizado por algunas particularidades que condicionan el panorama actual (Correia 2008, Serena 2009, Chacón 2011). Tras una etapa en la que los investigadores propiciaron la creación “bottom-up” de redes como NanoSpain (NanoSpain 2013), se pasó a otra etapa en la que el Gobierno incluyó una Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología en dos ediciones consecutivas, 2004-2007 y 2008-2011, del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación (Serena 2007). Durante el periodo 2004-2009, en plena expansión económica, se pusieron en marcha diferentes proyectos, con perfil básico y aplicado, se han creado plataformas tecnológicas y centros de investigación en nanotecnología dependientes de diferentes Ministerios, de los gobiernos de las Comunidades Autónomas, de universidades o de Organismos Públicos de Investigación como el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Entre estos centros sobresale el Laboratorio Internacional Ibérico de Nanotecnología de Braga, iniciativa conjunta hispano-portuguesa cuya finalidad es constituir un polo de desarrollo de la nanotecnología en el sur de Europa con clara vocación europea e iberoamericana.

También se han puesto en marcha otras grandes Infraestructuras Científico-Técnicas Singulares (ICTS) que facilitan el acceso a sistemas de ultra caracterización que la nanotecnología necesita. La más importante de estas instalaciones ha sido, sin duda alguna, el sincrotrón CELLS-ALBA. También se debe destacar que la nanotecnología ha sido una de las temáticas prioritarias en los acuerdos bilaterales firmados con países como EE.UU., Japón, Argentina, Brasil e India.

Como resultado de este conjunto de actuaciones se generó una dinámica positiva que se refleja actualmente en la existencia de una cierta masa crítica de grupos de investigación en nanociencia y nanotecnología, y en la aparición de un conjunto de empresas que están compitiendo, con esfuerzo, en este nuevo mercado emergente (Chacón 2011). En el año 2012, España ocupaba la décima posición del mundo en cuanto a publicaciones científicas relacionadas con la nanotecnología, tras descender del

noveno puesto que llegó a tener en 2009 (Nano Statistics 2013). En cuanto al número de solicitudes de patentes, actualmente España ocupa la posición número veinte. Estos datos reflejan el sempiterno problema de nuestra escasa capacidad de convertir en productos las muchas ideas que sí se generan en el laboratorio.

El nuevo Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016 (PEICTI 2013) ya no incorpora una actuación específica dedicada al fortalecimiento de la nanociencia y la nanotecnología, y el apoyo a estas disciplinas ha quedado incluido dentro de un Subprograma Estatal de Tecnología Facilitadoras Esenciales dentro del Programa Estatal de Impulso Empresarial en I+D+I. Esta nueva orientación de la estrategia del Gobierno, junto con los devastadores efectos de la actual crisis, pueden terminar con las buenas posiciones que ahora ocupa España en cuanto a la generación de conocimiento en nanociencia y nanotecnología. Para evitar este preocupante destino se deben poner en marcha políticas para, entre otros objetivos, mantener en el país la productiva generación de jóvenes científicos que tanto ha costado formar, lograr su inserción en un tejido productivo realmente innovador que demande nuevo conocimiento, y coordinar de forma eficiente las acciones, estrategias, equipamientos e infraestructuras que ya existen a lo largo y ancho de la geografía española.

5. DE LAS VENTAJAS A LOS INCONVENIENTES, DE LA PANACEA A LA PREOCUPACIÓN

Es evidente que la nanotecnología ha generado unas prometedoras expectativas en diversos sectores económicos. Sin embargo, además del actual contexto de crisis económica, se dan ciertas condiciones de contorno que deben ser tenidas en cuenta para que esas expectativas se cumplan. En estos momentos se sabe que la aparición de bienes de consumo o servicios basados en la nanotecnología se va a encontrar en su camino con problemas relacionados con aspectos éticos, medioambientales, sanitarios, de seguridad laboral, legales, culturales, etc. (Sweeney 2003, Shatkin 2008, Lacey 2009). Todos estos problemas condicionan fuertemente la percepción que la población tiene o puede tener sobre las aplicaciones de la nanotecnología (Burri 2008, Curral 2009, Satterfield 2009, Gómez-Ferri 2012). Aunque hoy por hoy más del 75% de los habitantes de los países desarrollados no conocen lo que es la nanotecnología, lentamente va aumentando el número de personas que no tienen una visión positiva y esperanzadora de la misma. Este cambio de percepción se debe tanto al desconocimiento generalizado sobre el tema como a la actividad de diversos grupos de opinión que han alertado de la proliferación de “nanoproductos” en el mercado sin que realmente se dispongan de datos sobre sus efectos en nuestra salud y en el medioambiente.

Los gobiernos de aquellos países más involucrados en el desarrollo de la nanotecnología han incluido en sus agendas tanto el desarrollo de estudios de opinión (Gómez-Ferri 2012) como de programas que traten de manera rigurosa algunos aspectos de la nanotecnología que no fueron inicialmente contemplados en las iniciativas estratégicas puestas en marcha hace una década. Estos nuevos aspectos están relacionados con el diseño de normas y protocolos de seguridad que deben seguirse en laboratorios y empresas (Comisión Europea, 2008A, 2008B, 2012), con la puesta en marcha de proyectos que determinen el impacto sobre la salud y el medioambiente de la nanotecnología (lo que ha dado lugar a la “nano-eco-toxicología”) (Karhu 2010), con la gestión o gobernanza de los riesgos en un contexto de incertidumbre (Echevarría 2005, Roco 2008, Vessuri 2009) o con la forma en la que se deben abordar los procesos de comunicación relacionados con la nanotecnología (Bonazzi 2010). De esta forma se espera que los frutos de la nanotecnología vayan llegando a los mercados con una mayor seguridad y menor rechazo social.

6. LA IMPORTANCIA DE LA ENSEÑANZA Y DIVULGACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA

En este nuevo contexto, en el que la sociedad está tomando conciencia de la llegada de la nanotecnología con sus beneficios y posibles problemáticas asociadas, la gestión de la información, la divulgación y la enseñanza, tanto formal como informal, se han convertido en elementos fundamentales de la implantación de la nanotecnología. Los ciudadanos deben estar informados de las ventajas de los productos y servicios basados en la nanotecnología y deben poseer criterios para determinar las posibles implicaciones de estos productos y servicios. Por otro lado se constata la urgente necesidad de aumentar el número de efectivos cualificados que puedan desarrollar las actividades de investigación, desarrollo e innovación en el ámbito de la nanotecnología tanto en universidades y centros de investigación como en empresas. Es necesario empezar a definir el perfil de la profesión de “nanotecnólogo”. Países como EE.UU. (NNI 2013) o Taiwán (Chih-Kuan 2006) fueron los primeros en diseñar planes que incluían la puesta en marcha de programas de posgrado dedicados a nanotecnología, la incorporación de contenidos de nanotecnología en asignaturas impartidas en distintas titulaciones universitarias y pre-universitarias, y actividades de divulgación de la nanotecnología dirigidas al público en general.

Un aspecto que debe tenerse en cuenta cuando se diseñan actividades de enseñanza y divulgación de la nanotecnología es que los elementos propios de ésta poseen una serie de características que dificultan el proceso de comunicación entre los científicos y la población (Batt 2008, Tagüeña 2011, Serena 2013). Estas características deben tenerse en cuenta para poder elaborar métodos efectivos que logren transmitir las ideas y los conceptos básicos que fundamentan la nanociencia, y explican los continuos avances que se plasman en nuevos productos y servicios. Las distintas iniciativas puestas en marcha en los diferentes países hacen uso de los innumerables canales de comunicación que afortunadamente existen actualmente para lograr transmitir al ciudadano conceptos como nanoescala, efectos de tamaño, fabricación “bottom-up”, bioinspiración, etc. y para mostrar las innumerables aplicaciones de la nanotecnología, tanto las existentes en nuestro supermercados y grandes almacenes como las que se vislumbran en los laboratorios.

Siguiendo la estela de los países pioneros en el diseño de las estrategias de enseñanza y divulgación de la nanotecnología, la mayor parte de los países avanzados o con economías emergentes ha establecido durante los últimos años poderosos programas específicos en este tema. Regiones como la Unión Europea han indicado a sus países miembros la necesidad de poner en marcha estos programas y cuantificar su impacto (Malsh 2008, Bonazzi 2010). Sin embargo no todos los países han seguido estas recomendaciones, ya que en países como España y Portugal la nanotecnología tiene notable presencia en el entorno universitario mientras que las iniciativas de formación no universitaria y de divulgación de la nanotecnología han sido bastante escasas, reduciéndose a la edición de unos cuantos libros, la esporádica publicación de artículos de divulgación, la organización de algunas exposiciones, etc. (Tutor 2011B). Este esquema también se reproduce en la mayor parte de los países iberoamericanos (Tutor 2011A) según se refleja en diferentes informes publicados por la Red “José Rodríguez Leite” de Formación y Divulgación en Nanotecnología (NANODYF 2013) financiada por el Programa CYTED, red que tiene entre sus objetivos el de proporcionar cierta cohesión a todos los esfuerzos realizados en Iberoamérica relacionados con la formación y la divulgación de la nanotecnología.

CONCLUSIONES

Se ha puesto de manifiesto el papel central que la nanotecnología ya tiene ahora mismo y va a tener a medio y largo plazo gracias a la explotación de su carácter multidisciplinar, de la capacidad de sintonizar las propiedades de la materia a través de los denominados efectos de tamaño, tanto clásicos como cuánticos, y de la adecuada combinación de técnicas de fabricación ascendentes y descendentes. Las aplicaciones de la nanotecnología se vislumbran en prácticamente todos los sectores económicos y ésto ha hecho que se hayan dirigido grandes inversiones públicas y privadas hacia la investigación y desarrollo de nuevos procesos, materiales y dispositivos que se basen en los nuevos conocimientos que

continuamente emergen del nanomundo. El aumento de inversiones ha dado lugar al crecimiento de publicaciones científicas y patentes, así como a la formación de nuevas generaciones de nanotecnólogos en las universidades de todo el mundo. Las promesas de la nanotecnología han propiciado un mercado emergente pero apreciable, que crece a buen ritmo en sectores como el de los nuevos materiales, el transporte, la electrónica, la producción de energía, la medicina, la cosmética, o la alimentación.

Mientras la nanotecnología comenzaba a salir de los laboratorios para incorporarse a las fábricas, han comenzado a ponerse de manifiesto ciertas incertidumbres asociadas a los posibles riesgos de los nanomateriales y nanodispositivos. El miedo, fundado o infundado, hacia la nanotecnología puede provocar desconfianza en los nuevos productos, incidir en la ralentización de las inversiones y hacer estallar todas las expectativas que se han alimentado durante los últimos quince años. Las estrategias seguidas por todos los países que han apostado por la nanotecnología son bastante similares e intentan cubrir varios frentes de actuación. Por un lado se han impulsado estudios sobre el impacto de la nanotecnología sobre la salud y el medioambiente, por otro se están definiendo normas y códigos que abarcan desde la seguridad laboral en factorías hasta el etiquetado de productos con nanocomponentes, y finalmente, se han puesto en marcha estrategias para mejorar la comunicación con la sociedad, promoviendo tanto la formación en entornos académicos como la divulgación dirigida a la ciudadanía en general.

En España la situación es algo paradójica. Las inversiones en nanotecnología por parte del gobierno central y de los gobiernos regionales han sido cuantiosas, logrando la consolidación de grupos de investigación, la creación de nuevos centros e infraestructuras, y la implantación de planes de estudios universitarios relacionados con el tema. Sin embargo, no se han hecho los esfuerzos necesarios para acercar a la población, de manera sistemática y organizada, los avances y posibles riesgos de este campo emergente y con gran potencial económico. De esta forma, la nanotecnología, a pesar de contar con una corta pero intensa historia y de ser una de las disciplinas claves para el desarrollo de la Humanidad durante esta primera mitad del siglo XXI, sigue siendo en nuestro país una gran desconocida.

BIBLIOGRAFÍA

- ACHARYA, A.; KAMILLA, S.K.; NAYAK, M.K.; ROY, G. S. (2011): *Nano the revolution of 21th Century*, Lat. Am. J. Phys. Educ. 5, 418-422.
- BATT, C.A.; WALDRON, A.M.; BROADWATER, N. (2008): Number, scale and symbols: The public understanding of nanotechnology, J. Nanopart. Res. 10, 1141-1148.
- BONAZZI, M.; VON BOSE, H.; TOKAMANIS, C. (2010): *Communicating Nanotechnology: Why, to whom, saying what and how?*. European Commission, Bruselas.
- BURRI, R.V.; BELLUCI, S. (2008): *Public perception of nanotechnology*, J. Nanopart. Res. 10, 387-391.
- CHACÓN, C.; ESTEVAO, V.; NARROS, C.; CORREIA, A.; SERENA, P.A. (2011): *Nanotechnology in Spain: Current situation and future challenges*, Convertech & E-Print 1 (6), 26-32.
- CHIH-KUAN, L.; TSUNG-TSONG, W.; PEI-LING, L.; HSU, S. (2006): *Establishing a K-12 nanotechnology program for teacher professional development*, IEEE Trans. on Education 49, 141-146.
- COMISIÓN EUROPEA (2008): *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee, Regulatory Aspects of Nanomaterials*, COM 366.
- COMISIÓN EUROPEA (2008): *Recommendation on a code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research*, COM 424.
- COMISIÓN EUROPEA (2012): *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee, Second Regulatory Review on Nanomaterials*, COM 572.

- CORREIA, A. (Editor) (2008): *Nanociencia y Nanotecnología en España: Un análisis de la situación presente y de las perspectivas de futuro*. Fundación Phantoms, Madrid.
- CORREIA, A.; PÉREZ, M.; SÁENZ, J.J.; SERENA, P.A. (2007): *Nanoscience and nanotechnology: Driving research and applications*, Phys. Stat. Sol. (RRL) 1, A68-A72.
- CURRALL, S.C. (2009): *New insights into public perceptions*, Nature Nanotechnology 4, 79-80.
- DELGADO, G.C. (2008): *Guerra por lo invisible: Negocio, implicaciones y riesgos de la nanotecnología*. Ceiih, UNAM, México.
- ECHEVARRÍA, J. (2005): *Gobernanza de las nanotecnologías*, Arbor Ciencia, Pensamiento y Cultura 715, 301-315.
- GÓMEZ-FERRI, J. (2012): *La comprensión pública de la nanotecnología en España*, Revista CTS 20, vol. 7, 177-207.
- H2020: Programa Marco para la Investigación y la Innovación de la Unión Europea 2014-2020, en <http://ec.europa.eu/research/horizon2020/>
- KAHRU, A.; DUBOURGUIER, H.C. (2010): *From ecotoxicology to nanoecotoxicology*, Toxicology 269, 105-119.
- KLEIKE, J.W. (Editor) (2009): *National Nanotechnology Initiative: Assessment and Recommendations*. Nova Science Pub. Inc., Nueva York.
- LACEY, H. (2009): *La ética y el desarrollo de la nanotecnología*, Revista Realidad 119, 77-90.
- MALSH, I. (2008): *Nano-education from a European perspective*, Journal of Physics: Conference Series 100, 032001.
- NANO STATISTICS: Nano Science, Technology and Industry Scoreboard, <http://statnano.com>
- NANODYF: Red “José Rodríguez Leite” de Formación y Divulgación en Nanotecnología (NANODYF), en la web <http://www.nanodyf.org>
- NANOSPAIN: Red Española de Nanotecnología (NanoSpain), <http://www.nanospain.org>
- NNI: National Nanotechnology Initiative, <http://www.nano.gov/>
- PEICTI: Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, <http://www.idi.mineco.gob.es/>, visitada el 15 de octubre de 2013.
- ROCO, M.C. (2008): *Possibilities for global governance of converging Technologies*, J. Nanopart. Res. 10, 11-29.
- SATTERFIELD, T.; KANDLIKAR, M.; BEAUDRIE, C.E.H.; CONTI, J.; HARTHORN, B.H. (2009): *Anticipating the perceived risk of nanotechnologies*, Nature Nanotechnology 4, 752-758.
- SERENA, P.A. (2007): *The implementation of the Action Plan for Nanosciences and Nanotechnologies in Spain (2005-2007)*, E-Nano Newsletters 15, 22-34.
- SERENA, P.A. (2009): *La implantación de la nanotecnología en España: Muchas luces y alguna sombra*, Mundo Nano 2 (2), 74-90.
- SERENA, P.A. (2010): *¿Qué sabemos de la Nanotecnología?*. La Catarata - CSIC, Madrid.
- SERENA, P.A. (2013): *La Nanociencia y la Nanotecnología: En la frontera de lo pequeño*, Revista Española de Física 27(1), 29-33.
- SHATKIN, J.A. (2008): *Nanotechnology: Health and Environmental Risks (Perspectives in Nanotechnology)*. CRC Press, Boca Raton.
- SWEENEY, A.E.; SEAL, S.; VAIDYANATHAN, P. (2003): *The promises and perils of nanoscience and nanotechnology: Exploring emerging social and ethical issues*, Bulletin of Science, Technology & Society 23, 236-245.
- TAGÜEÑA, J. (2011): *El manejo de las escalas como obstáculo epistemológico en la divulgación de la nanociencia*, Mundo Nano 4 (2), 83-102.
- TUTOR, J.; SERENA, P.A. (2011A), *Situación de la divulgación y la formación en nanociencia y nanotecnología en Iberoamérica*, Mundo Nano 4 (2), 12-17.
- TUTOR, J.; SERENA, P.A. (2011B): *La divulgación y la formación de la nanociencia y la nanotecnología en España: Un largo camino por delante*, Mundo Nano 4 (2), 48-58.
- VESSURI, H. (2009): *Gobernabilidad del riesgo de la convergencia tecnológica*, Tecnología y Construcción 25, 79-85.
- XUE, A. (2011): *Nanotechnology Funding: Corporations Grab the Reins*. Lux Research, Nueva York.