

NANOMATERIALES: ¿QUO VADIS? UNA AGENDA PROSPECTIVA PARA EL CENTRO DE EXCELENCIA DE NUEVOS MATERIALES –CENM–

Por

Alfonso Reyes Alvarado¹, Gustavo Pedraza Camargo², Pedro Prieto³

Resumen

Reyes Alvarado, A., G. Pedraza Camargo, P. Prieto: Nanomateriales: ¿quo vadis? una agenda prospectiva para el centro de excelencia de nuevos materiales –CENM– Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(123): 213-233, 2008. ISSN 0370-3908.

Por sus propiedades particulares, y potencial aplicabilidad, los nanomateriales han sido objeto de estudio en los laboratorios desde hace más de dos décadas. Para comprender cómo llegó la investigación en estos materiales artificiales a generar una de las industrias de mayor crecimiento en el mundo, se presenta una retrospectiva de su desarrollo histórico. Posteriormente se presenta una descripción breve del impacto actual, de estos materiales, en la investigación, la innovación y la tecnología. Lo anterior se describe en término de publicaciones, patentes, recursos invertidos en su desarrollo, y empresas creadas en torno a su producción. Dado el poco conocimiento que se tiene sobre los efectos de estos materiales sobre los seres vivos, son muchas las legislaciones que también han debido adaptarse a estas nuevas tecnologías, las cuales realizan un control ético y de seguridad sobre la manipulación y fabricación de nanotecnología. Se presenta un futuro cercano en el desarrollo de la nanotecnología con base en los factores de cambio identificados por la Fundación de la Innovación Bankinter. Finalmente se presentan las líneas estratégicas a través de una agenda prospectiva desarrollada desde la academia con proyección a la industria nacional, planteada por el CENM con base en estos factores de cambio que podrían delinear el desarrollo de la nanotecnología a futuro en Colombia.

Palabras clave: nanomateriales, prospectiva tecnológica, centros de excelencia.

1 Universidad de los Andes. Correo electrónico: areyes@uniandes.edu.co

2 Universidad de Ibagué. Correo electrónico: gpedrazacamargo@yahoo.com

3 Universidad del Valle. Correo electrónico: directorcenm@calima.univalle.edu.co

Abstract

Due to its particular properties and potential many applications, nanomaterials have been a target for research during the last two decades. In order to understand the industrial impact of the research in nanomaterials, we present a brief historical accounting of its development. Then we show its current impact in research, innovation and technology. In order to show this impact we use as variables the number of publications, patents, the amount of investment (public and private) and the number of companies, labs and research institutions that have been created during the last decades. Because of the loosely understanding we still have about their impact on living beings and the environment, governments in many countries have decided to adapt current legislation to deal with issues of health, security and ethics during its fabrication and commercialization. We also show a possible future scenario on the development of nanotechnology based of a recent workshop run by the Fundación de la Innovación, Bankinter in Spain. Finally, we show a prospective agenda for CENM in which the main strategic lines are delineated taking into account these trends in research and the industry. These strategic lines could be used to guide the development of nanotechnology in Colombia in the near future.

Key words: nanomaterials, technological foresight, center of excellence.

Nanotecnología: la realización de un sueño

La nanotecnología es un tema que ha sido ampliamente divulgado en todas las áreas del conocimiento humano (**Fundación de la Innovación Bankinter, 2006**). Hoy en día cualquier persona ajena del ambiente científico ha escuchado mencionar el término y seguramente lo asocia con ambientes futuristas conformados por artefactos que solo eran citados en textos de ciencia ficción. Textos que anticipaban mundos imaginarios en los que el hombre tendría el poder de manipular la materia para dar solución a problemas de gran envergadura como los relacionados con el deterioro del medio ambiente. Futuros en donde se construirían diminutos robots (nanobots) que fueran capaces de navegar por nuestra corriente sanguínea y reparar tejidos orgánicos para prolongar nuestra vida. Estas visiones eran los puntos centrales de escritores visionarios que anticipaban tiempos de prosperidad y una civilización altamente tecnificada. La ciencia actual, sin embargo, orienta sus esfuerzos hacia nuevos tecno-horizontes que sobrepasan las expectativas literarias.

La nanotecnología, más que un mero progreso en el ilimitado campo de la tecnología, representa el proceso de nacimiento de una nueva «era». Como un primer paso para entender la amplitud de la importancia de la nanotecnología y los nanomateriales, es fundamental definir apropiadamente este término, acuñado hace unos decenios, y que hoy enmarca nuestro desarrollo futuro. Se define la nanotecnología como el desarrollo y la aplicación práctica de estructuras y sistemas en una escala nanométrica, es decir, entre 1 y 100 nanómetros, siendo un nanómetro la millonésima parte de un milímetro (**Mansoori, 2005**). En

otras palabras, se está hablando de objetos cuyo tamaño es cien mil veces más pequeño que el diámetro del cabello humano.

Para hacerse a una idea práctica de esta escala de medida, la siguiente secuencia puede ser de utilidad. El tamaño aproximado de una hormiga, por ejemplo, es de 5 milímetros; el de la cabeza de un alfiler, entre uno y dos milímetros; el cabello humano puede tener de 10 a 50 micrómetros de ancho; las células de la sangre pueden medir de 2 a 5 micrómetros; el DNA mide unos 2,5 nanómetros y los nanotubos de carbón tienen un diámetro de 2 nanómetros.

La importancia del tamaño radica en que en la escala nanométrica las propiedades ópticas (coloración, absorción ultravioleta, luminiscencia y emisión), mecánicas (ultra-endurecimiento, anti-oxidación y anti-wear), térmicas (intercambio de calor, punto de fusión y resistencia térmica), eléctricas (conductividad y aislamiento), magnéticas y químicas de los materiales cambian al cambiar el tamaño (**Park Cirlin, 2004**).

Por ejemplo, el color de un objeto en esta escala varía dependiendo del tamaño de las partículas que lo componen. Si el ancho es de 5 nanómetros se verá de color plata, si se incrementa su ancho a 44 nanómetros su color cambiará a violeta y si se incrementa a 122 nanómetros se observará de color rojo. De hecho, el color rojo que se observa en los vitrales que se utilizaron para adornar las iglesias cristianas en Europa se debe a partículas de oro de escala nanométrica depositadas en el vidrio.

La variación de estas propiedades al modificar el tamaño de los componentes de un objeto permite construir una gran variedad de materiales que no existen de manera natural. Este es el principio que dio origen a los llamados nanomateriales. Hoy en día se comercializan varios cientos de estos productos como las baterías de litio, los nanocables para electrónica, los nanomedicamentos, la tecnología de las pantallas planas, algunos productos cosméticos, etc.

La fortaleza de la nanotecnología como práctica científica radica en que constituye un ensamblaje interdisciplinario de varios campos de las ciencias naturales que están altamente especializados. Por ejemplo los físicos juegan un importante rol ya que no sólo utilizan, arman e interpretan teorías, sino que diseñan y construyen dispositivos como microscopios de tunelamiento o de fuerza atómica, mediante los cuales pueden observar la estructura atómica y las propiedades físicas de los materiales. Por otro lado, alcanzar la estructura del material deseado y las configuraciones atómicas a nivel nanométrico es el papel que comparten los químicos junto con los físicos, los matemáticos y los ingenieros. En medicina, el desarrollo específico dirigido a nanopartículas promete ayudar al tratamiento de ciertas enfermedades. Aquí la ciencia ha alcanzado un punto en el que las fronteras que separan las diferentes disciplinas han empezado a diluirse. Por esta razón, la nanotecnología se considera como una ciencia convergente que permite la integración de la química, la bioquímica, la biología molecular, la física, la electrónica y la informática.

La nanotecnología corresponde al siguiente paso en la evolución tecnológica, una nueva era con imponentes cambios que transformarán la sociedad. Un sueño que se aproxima cada vez más a la realidad. Pero, ¿cómo se desarrolló la capacidad para manipular la materia a esta escala? La siguiente reseña (Fundación de Innovación Bankinter (2006)) sintetiza los principales eventos que determinaron su nacimiento y desarrollo inicial.

- Hacia el año 400 a.C. los griegos acuñan los términos de *elemento* y *átomo* para referirse a los componentes más pequeños constitutivos de la materia. La intuición de Demócrito de un mundo no continuo que está compuesto de partículas elementales de tamaño finito, puede considerarse como la referencia conceptual más antigua en este campo.
- Pasaron dos mil trescientos años para que Richard Feynman, seis años después de recibir el premio Nóbel de física, desarrollara las consecuencias de esta intuición en su célebre charla inaugural del congreso anual

de la Sociedad Americana de Física, el 29 de diciembre de 1959. Con el sugestivo título de “There’s Plenty of Room at the Bottom”, Feynman hizo una invitación a observar la infinidad de posibilidades que se abrirían para la elaboración de nuevos materiales si existiesen las herramientas necesarias para manipular, átomo a átomo, los componentes de la materia (Feynman, 1959).

- En 1966 aparece la película “Un viaje fantástico”, en donde se cuenta la travesía de un grupo de científicos que han sido miniaturizados para navegar por el torrente sanguíneo de una persona que tiene un tumor, llegar a este y destruirlo. Por primera vez se considera como posible esta forma de tratar una enfermedad, algo que hoy en día, cuarenta años después, es una de las principales aplicaciones de la nanotecnología.
- El término nanotecnología aparece unos años después, en 1974, cuando Norio Taniguchi lo acuña como una necesidad para diferenciar fenómenos que ocurren entre la nanoescala y la microescala con 1000 unidades de diferencia.
- En 1981 se inventa el microscopio de efecto túnel que permite observar una molécula al nivel atómico. Heinrich Rohrer y Gerd Kart Binnig, investigadores de IBM, recibieron el premio Nóbel de física en 1986 por este trabajo, casi treinta años después de la conferencia de Feynman.
- El primer artículo científico sobre nanotecnología, en donde se sugiere la posibilidad de fabricar máquinas complejas a esta escala, lo publica el doctor K. Eric Drexler con el sugestivo título de “Protein Design as a Pathway to Molecular Manufacturing”, en 1981.
- Cuatro años después ocurre un nuevo hito, se descubre la estructura de los fullerenos o buckyballs. Los fullerenos son una forma muy particular de la molécula del carbono diferente a la estructura del diamante y del grafito (figura 1). Esta forma permite su uso para lubricar superficies o como vehículo de entrega de

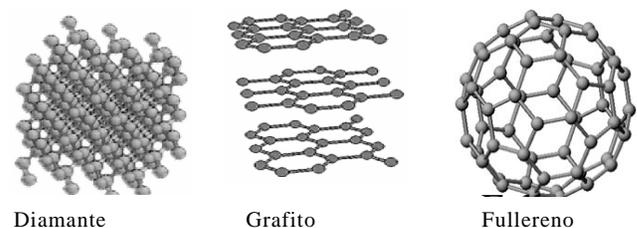


Figura 1. Variaciones de la estructura de moléculas de carbono.

medicamentos que son colocados en su interior.

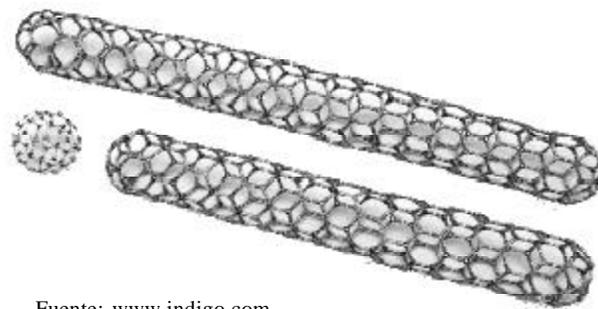
- El nombre fullerenos es un homenaje al trabajo del arquitecto norteamericano Buckminster Fuller quien dedicó gran parte de su vida al diseño de estructuras estables basadas en fuerzas de tensión. Sus más celebres construcciones son los famosos domos geodésicos. La foto de la figura 2 es uno de estos domos construido en Québec, Canadá. Puede apreciarse la similitud con la estructura de los fullerenos. En uno de



Figura 2. Estructura de uno de los domos geodésicos diseñados por Bukminster Fuller.

sus libros más conocidos Fuller (1979) predijo la existencia de estas estructuras a nivel molecular.

- En 1986 se construyó el primer microscopio de fuerza atómica que permitió manipular átomos uno a uno mediante el contacto entre el sensor y el átomo. Este nuevo instrumento permitió que tres años después científicos de IBM, con una variación del microscopio de efecto túnel, lograran deletrear el nombre de la compañía usando 35 átomos de xenón.
- El siguiente descubrimiento importante en la evolución de la nanotecnología fue el de los nanotubos de carbón que realizó Sumo Lijita (1991) en los laboratorios de NEC en Japón (ver figura 3). Estos nanotubos son las fibras más fuertes que se conocen hoy en día, su resistencia puede ser hasta 100 veces mayor que la del acero por unidad de peso. Son materiales de gran flexibilidad, con una conductividad superior, químicamente inertes, tienen propiedades intermedias de semiconductores y de metales, y una superconductividad intrínseca. Es tan prometedor su empleo que tan solo en los Estados Unidos existen más de veinte compañías dedicadas a su producción industrial.



Fuente: www.indigo.com

Figura 3. Nanotubos de carbón

- A partir de estas estructuras el equipo del Weizmann Institute of Science en Israel desarrolló en 1993 las primeras nanoestructuras que exhibían propiedades sorprendentes despertando, de esta manera, el interés mundial por el empleo de los nanotubos de carbón como base para la construcción de nuevos materiales. Cinco años después el equipo de investigación de Cees Dekker, de la Universidad Tecnológica de Delft en Holanda, construyó el primer transistor usando un nanotubo de carbón.
- En 1999 James Tour, en la Universidad de Rice, y Mark Reed, en la Universidad de Yale, elaboraron un interruptor molecular mostrando que los aparatos informáticos a escala nano podían construirse a partir de una sola molécula. En este mismo campo, y tres años atrás, George Whitesides había construido algunos circuitos integrados para computadores de 30 nanómetros de ancho. Estos circuitos podían operar a la increíble velocidad de un teraflop, es decir, cuatro mil veces más rápido que los computadores personales de la época.
- En el cambio del milenio, el mayor impulso al desarrollo de la nanotecnología provino del discurso que el presidente Clinton pronunció ante el congreso norteamericano, en donde reconoció este campo como el más prometedor para el desarrollo de la industria estadounidense de la siguiente década. Al lanzar la National Nanotechnology Initiative, Clinton solicitó un presupuesto de tres billones de dólares para apalancarla.
- El mismo año en que el programa gubernamental despegaba, Don Eigler y sus colegas en IBM crean el primer “corral cuántico” que permite pasar a la escala nanométrica el desarrollo de la computación. La figura 4 ilustra este cambio de escala en este dominio. En efecto, mientras que en 1947 los primeros transistores desarrollados en los laboratorios Bell tenían un tama-

ño del orden de milímetros; hoy en día Intel produce circuitos integrados del orden del micrómetro. En el futuro cercano, como lo muestra el trabajo de IBM, estos circuitos estarían en el orden del nanómetro (ver figura 4). A este desarrollo se unieron, al año siguiente, varios otros: la primera puerta lógica conformada por una sola molécula desarrollada por Phaedon Avouris de IBM; la construcción de un transistor con un nanotubo de carbón que podía encenderse y apagarse con un solo electrón; la fabricación del diodo emisor de luz (LED) más pequeño que existe a partir del uso de nanocables; y una tarjeta de memoria desarrollada por investigadores de IBM en Zurich con una capacidad de un terabit/pulgada.

Al año siguiente de la iniciativa norteamericana lanzada por el presidente Clinton, la Unión Europea responde declarando la nanotecnología como un área estratégica para el desarrollo de la región y asigna un presupuesto de 1300 millones de euros para adelantar investigación en este campo durante los siguientes cinco años. Al mismo tiempo Japón, Taiwán, Singapur, China, Israel y Suiza lanzan programas similares, dando comienzo a la carrera tecnológica más importante del nuevo siglo.

De la nano-infancia a la nano-adolescencia: de 1980 a 2005

Una mirada prospectiva debe partir por comprender la génesis del fenómeno que se estudia. La sección anterior se concentró precisamente en este punto. En esta sección,

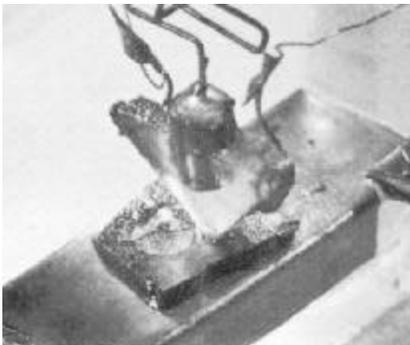
por otra parte, se describe el estado en que se encuentra el desarrollo actual de la nanotecnología.

La nanotecnología como un sistema productivo

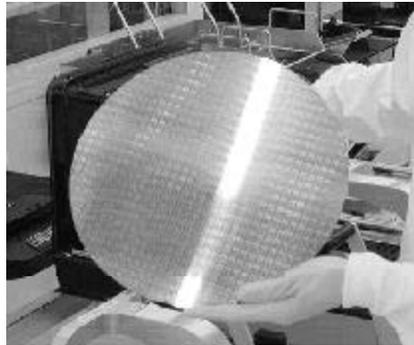
Como toda tecnología, la investigación a escala nanométrica busca la producción de bienes o servicios que puedan aportar en la solución de problemas específicos o al avance de otras áreas del conocimiento. Es posible, por lo tanto, identificar una cadena de valor que tradicionalmente parte de las actividades de investigación científica y termina con el ofrecimiento a la sociedad de estos bienes o servicios tecnológicos⁴.

A lo largo de esta cadena de valor se requiere la intervención de cuatro agentes: la universidad, la empresa, la sociedad y el gobierno. El desarrollo nanotecnológico, por otra parte, involucra el conocimiento en biología, matemáticas, física, química, materiales, ingeniería y tecnologías de información. Por lo tanto, se requiere de un trabajo multidisciplinario e interdisciplinario para producir estos bienes o servicios que, además, deberán incorporarse a la dinámica empresarial para responder a necesidades de un mercado potencial.

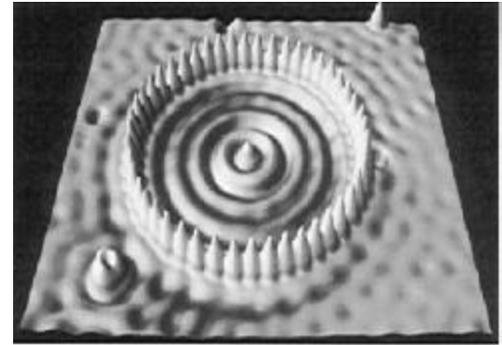
Esta concepción de la nanotecnología como un sistema productivo permite una planificación cuidadosa de su desarrollo. Es así como se deben dedicar recursos para impulsar las siguientes acciones: a) la construcción de la infraestructura necesaria para la investigación básica; b) la formación del recurso humano especializado;



Primer transistor. Laboratorios Bell, 1947. Escala en mm.



Circuitos integrados. Laboratorios de Intel, 2004. Escala en μm



Primer corral cuántico. Laboratorios de IBM, 2000. Escala en nm.

Figura 4. Contraste de tamaño en el desarrollo de componentes básicos para la computación.

⁴ Más adelante, cuando se aborde el tema del desarrollo futuro de los nanomateriales, se planteará cómo este orden tradicional debe invertirse.

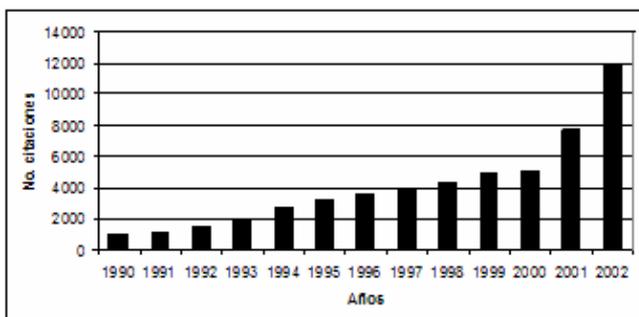
c) el desarrollo de herramientas adecuadas para apoyar la investigación; d) el ofrecimiento de becas y subvenciones para patrocinar las investigaciones; e) el surgimiento de empresas dedicadas a la producción masiva de los bienes o servicios generados; y f) el posicionamiento y distribución de estos bienes y servicios que respondan a las necesidades de un mercado potencial en crecimiento.

En el último cuarto de siglo el desarrollo de la nanotecnología ha sido vertiginoso. Para justificar esta apreciación se tomarán en cuenta cuatro perspectivas desde las cuales describir este desarrollo: a) desde la vigilancia tecnológica (o cienciometría) observando las publicaciones, citas de artículos y patentes relacionadas con esta tecnología; b) apreciando la capacidad institucional, es decir, los centros de investigación, las universidades y las empresas que respaldan este desarrollo; c) las fuentes de financiación, pública y privada, que impulsan esta tecnología; y d) los riesgos que se desprenden de su propio desarrollo.

Vigilancia tecnológica

La importancia científica de una tecnología puede medirse por el número de publicaciones y citas que se hacen sobre el tema. En 1987 el número de publicaciones en inglés que tenían como una de sus palabras claves el término nano en el índice de citas ISI era de 200 referencias. Casi tres lustros después, en 2001, la literatura científica incluyó cerca de 7700 citas y en el siguiente año esta cifra había ascendido a cerca de 12000 (ver la figura 5).

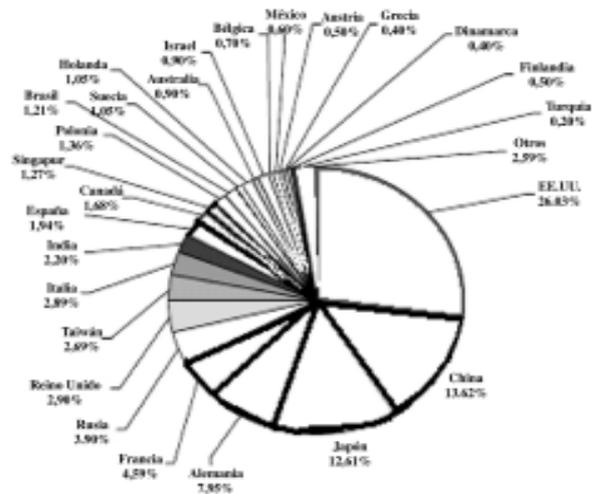
Si se observa la distribución por región del número de publicaciones científicas en nanotecnología en un período de diez años, entre 1992 y 2001, se aprecia que el mayor número proviene de Europa (39% en el período 1992-1995 y 41% en el período 1998-2001) seguido por Estados Unidos (34% en el primer período y 24% en el segundo) y



Fuente: índice ISI.

Figura 5. Número de veces que aparece la referencia *nano* como palabra clave de artículos científicos publicados en inglés (1990 a 2002).

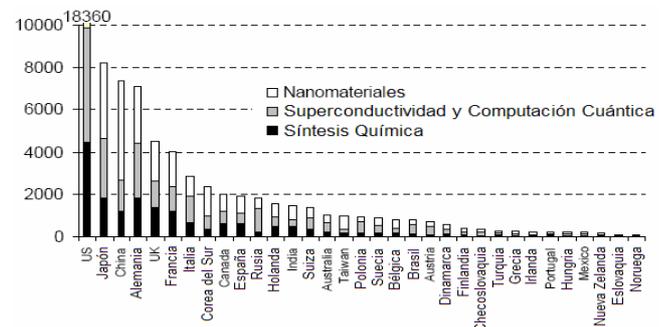
luego por Japón y los otros países asiáticos. Aquí vale la pena destacar el crecimiento vertiginoso de las publicaciones provenientes de China (el mayor participante en la categoría de otros países asiáticos) que se duplicó de un período al otro (Glänzel *et al.*, 2003). Sin embargo, cuando se observa el número de publicaciones por país es evidente el predominio de Norteamérica como principal autor de artículos publicados sobre el tema (figura 6).



Fuente: (*Nanotecnología en España*). Publicado por la Fundación Madrid, 2005).

Figura 6. Distribución por países de las publicaciones y actas de congresos en nanotecnología según la base de datos INSPEC para el período 2003-2004.

Cuando se indaga por los temas específicos sobre los cuales se publica, se encuentra que China se destaca en artículos sobre nanomateriales, seguido por Japón, Alemania y Francia. Los Estados Unidos, por su parte, parecen concentrar sus esfuerzos en los temas de superconductividad y computación cuántica, seguidos por artículos relacionados con la síntesis química (ver figura 7).



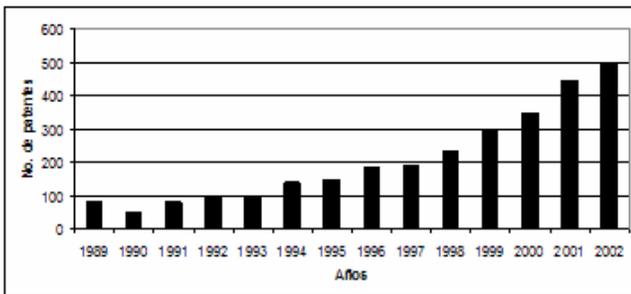
Fuente: Science Citation Index.

Figura 7. Número de publicaciones por país y tema de investigación (1999-2004).

Dado que el impacto de una tecnología no se mide únicamente por medio de las publicaciones científicas que se materializan sino también por la forma en que trasciende este conocimiento a un público más general. En este sentido, vale la pena mencionar que en septiembre de 2001 la revista Scientific American dedicó todo su número a la nanotecnología y que varios periódicos de distribución masiva, como el USA Today, cuentan hoy en día con secciones y reporteros especializados en el tema (Grupo ETC, 2003).

La relevancia de la nanotecnología como actividad actual de investigación se puede apreciar al observar el número de premios Nóbel que han sido otorgados a científicos que trabajan en el tema: cuatro en el campo de física y cinco en la química.

Por otra parte, el impacto potencial de una tecnología sobre la industria se mide directamente por el número de patentes que se otorgan. Aquí, nuevamente, la nanotecnología ha tenido una importante figuración. Mientras que en la década de los ochenta hubo 60 solicitudes de patentes relacionadas con el tema, veinte años después esta cifra se había incrementado a cerca de 445 por año (Grupo ETC, 2003). El crecimiento exponencial del número de patentes solicitadas, relacionadas con lo nanométrico, en solo Estados Unidos, se presenta en la figura 8.

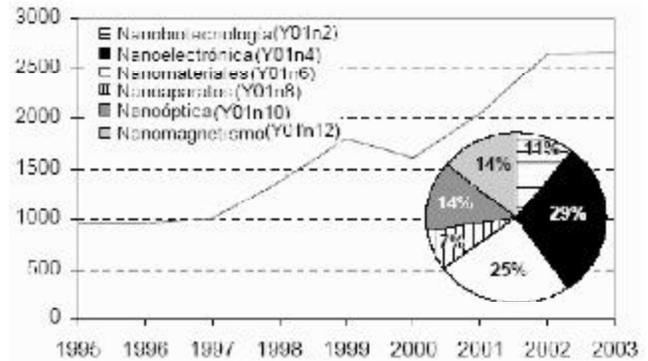


Fuente: (Grupo ETC, 2003).

Figura 8. Patentes relacionadas con nanotecnología en Estados Unidos (1989-2002).

Si se observa el número de patentes solicitadas a nivel mundial, discriminando por el tema específico de la aplicación, se encuentra que en 2003 las patentes sobre nanoelectrónica (29%) y nanomateriales (25%) fueron las más solicitadas (ver figura 9).

Al indagar por la tasa anual de crecimiento del número de patentes por tema se encuentra que, al comparar dos períodos (1995-1999 y 1999-2003), en el segundo período esta tasa es mayor en nanobiotecnología y nano-óptica, pero en términos absolutos el crecimiento de patentes en nanomateriales y nanoelectrónica es superior.

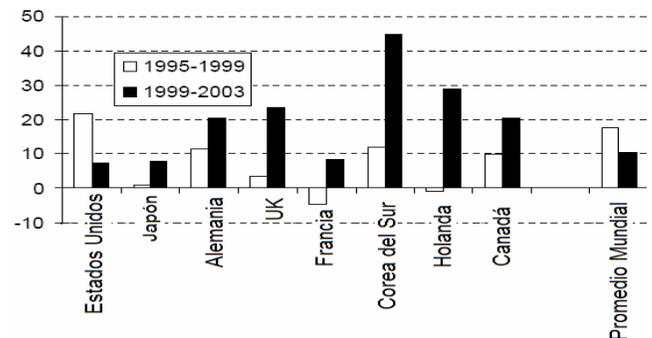


Fuente: Oficina Europea de Patentes (EPO, por sus siglas en inglés), 2006.

Figura 9. Número de patentes en el mundo (1995-2003) y el número de patentes por tema en 2003.

Las regiones que más patentes obtienen son América del Norte (Estados Unidos y luego Canadá), seguido por Asia (especialmente Corea del Sur y Japón) y, finalmente, Europa (Alemania, Gran Bretaña, Francia y Holanda). Sin embargo, cuando se indaga por el país de donde es natural el inventor o inventora, las cifras de las regiones de América y Asia tienden a acercarse. Esto puede explicarse por dos razones: 1) por la movilidad de los investigadores entre países; y 2) por el hecho de que la dueña del Asian Research Center es una compañía norteamericana.

Finalmente, si se observa la tasa anual de crecimiento del número de patentes por país, es importante destacar el impresionante desarrollo de Corea del Sur y de Holanda, seguidos por Gran Bretaña y Canadá. Los Estados Unidos, por su parte, han visto reducida la tasa anual de patentes en el tema (figura 10).



Fuente: Oficina Europea de Patentes (EPO, por sus siglas en inglés), 2006.

Figura 10. Tasa anual de crecimiento del número de patentes por país (1995-2003).

Capacidad institucional

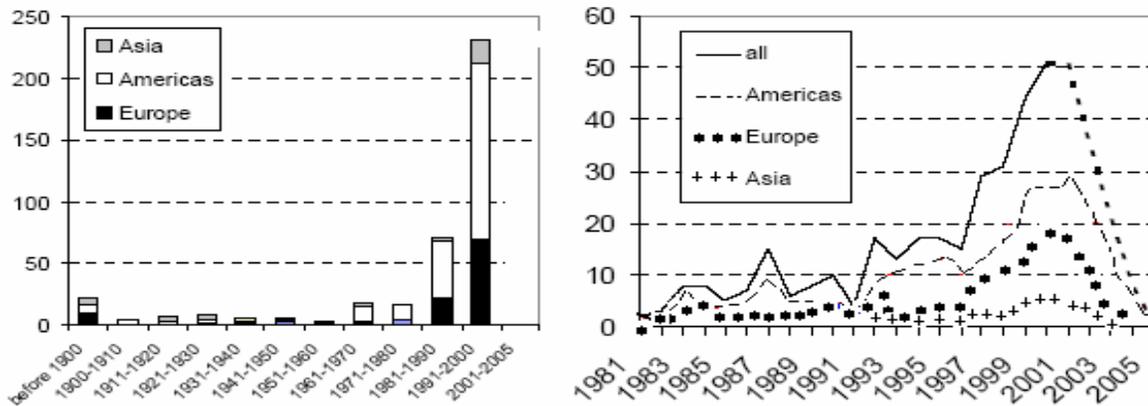
El desarrollo de una industria en nanotecnología requiere del trabajo articulado de las universidades, los centros de investigación y las empresas. En esta sección se presentan algunas cifras que dan cuenta de esta capacidad institucional en el último cuarto de siglo.

El número de empresas nuevas que se dedican a la nanotecnología solo empieza a crecer apreciablemente a partir de 1996. El mayor número de estas empresas están localizadas en las Américas seguida por Europa y finalmente Asia (figura 11).

Estas empresas se dedican principalmente al tema de los nanomateriales (33%) seguido por la nanobiotecnología (32%), la producción de herramientas para la investigación en este campo (25%) y, finalmente, nanoaparatos (10%) como se puede observar en la figura 12.

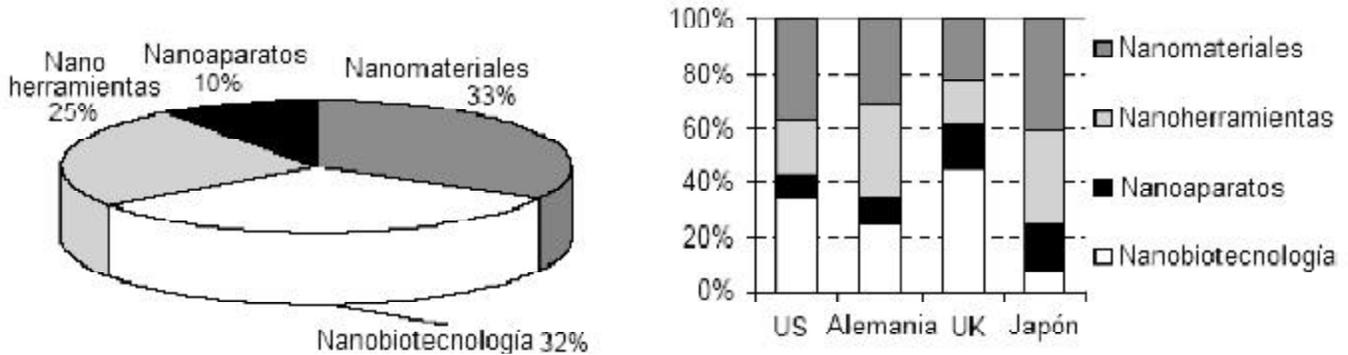
En la misma figura se aprecia que mientras que las empresas japonesas y norteamericanas se centran en la producción de nanomateriales, las alemanas se concentran en la fabricación de herramientas y las británicas se dedican principalmente al área de la nanobiotecnología.

En el 2003, la mayoría de estas empresas se encontraba en los Estados Unidos (alrededor de 160) seguidas por empresas Alemanas (100) y, un poco más lejos, estaban las compañías radicadas en el Reino Unido (poco más de 25). Si se ordenan por ventas anuales, las empresas norteamericanas eran las más exitosas. Casi 40, de una muestra de 357, recibieron entre diez y quinientos millones de dólares en ventas directas en el 2003. Otras diez empresas estadounidenses lograron ventas, ese mismo año, por más de US \$500 millones de dólares. En ingresos les siguen a las norteamericanas las empresas alemanas, las británicas y las japonesas. Es claro que ésta era una industrial que al inicio del milenio se mostraba como un negocio promisorio.



Fuente: Nanoinvestors News database en www.nanoinvestorsnews.com

Figura 11. Nuevas empresas dedicadas a la nanotecnología (1980-2005).



Fuente: Fecht et al. (2003).

Figura 12. Área en la que trabajan las nuevas empresas de nanotecnología en el 2003.

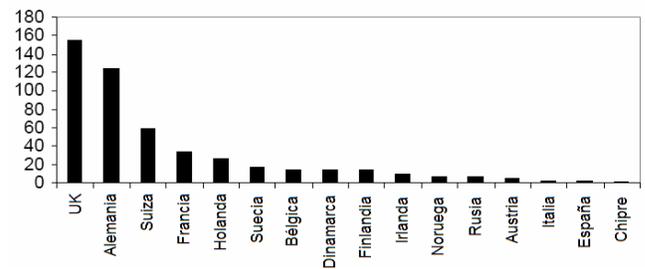
El desarrollo de la industria de la nanotecnología ha seguido estrategias claramente diferenciadas en Norteamérica, Europa y Asia. Mientras que en el país del norte predomina la creación de empresas semilla, así como de pequeñas y medianas empresas, en Europa y Asia predominan las universidades y los centros de investigación como pilares del desarrollo de la nanotecnología. Es abrumadora la concentración de esta capacidad institucional en tan solo cuatro países: Estados Unidos, Japón, Alemania y el Reino Unido.

Para conocer en detalle el tipo de productos que estaban comercializando la mayoría de estas empresas, se realizó un estudio a profundidad en el 2004 en 43 de las principales empresas norteamericanas (Científica, 2003). Tal vez el punto más relevante que se deriva de este estudio es que la gran mayoría de estas empresas se dedican a la producción y comercialización de productos, tecnologías y servicios que sirven de base para la realización de otros procesos más complejos de la industria. Este es un claro indicador del estado de una industria naciente que busca rápidamente fortalecerse.

Entre estos productos se encuentra la producción de nanotubos de carbono y fullerenos (21% de las empresas de la muestra⁵); la elaboración de nanopartículas de metal, cristal y cerámica (23,3%); el desarrollo de programas de computación, equipos, modelos de simulación y de visualización (21%); los servicios de consultoría y asistencia técnica (21%); y el desarrollo de otros útiles de apoyo para la nanociencia (11,6%).

Por otra parte, 17 de las 43 firmas estudiadas (el 39,5%) se dedicaba a la producción de nanomateriales para diferentes usos; el 18,6% fabricaba sensores de diversos tipos; seis empresas elaboraban compuestos químicos; cuatro fabricaban componentes de electrónica, tres estaban en el negocio de elementos ópticos, dos hacían filtros y otras dos se dedicaban a producir nanofluidos para impresión.

El panorama de la industria en Europa, por su parte, muestra un predominio del Reino Unido, Alemania y Suiza en donde se concentran el mayor número de empresas dedicadas a este campo (ver figura 13). Este número, en todo caso, es muy inferior al número de empresas norteamericanas lo que ha llevado a la Unión Europea a impulsar una estrategia para incentivar a sus científicos a que dediquen tiempo y esfuerzos para producir y comercializar los resultados de sus investigaciones.



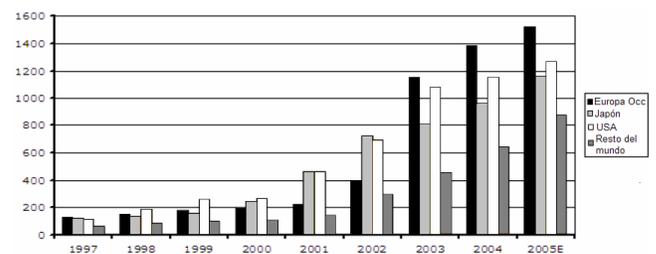
Fuente: Instituto de nanotecnología.

Figura 13. Empresas dedicadas a la nanotecnología en Europa (2005).

Financiación

La prioridad que tanto el sector público como el privado le dan al desarrollo de una industria está directamente asociada con los recursos que le destinan. En este sentido, una mirada a la inversión pública en nanotecnología durante la última década es importante.

La gráfica de la figura 14 muestra el crecimiento exponencial en la inversión pública a partir del cambio de milenio, precisamente cuando el presidente Clinton pronuncia su mencionado discurso ante el Congreso norteamericano. Mientras que Japón venía con una inversión similar a la estadounidense, la inversión en Europa Occidental comienza a acelerarse a partir de 2002.



Fuente: (Científica, 2003).

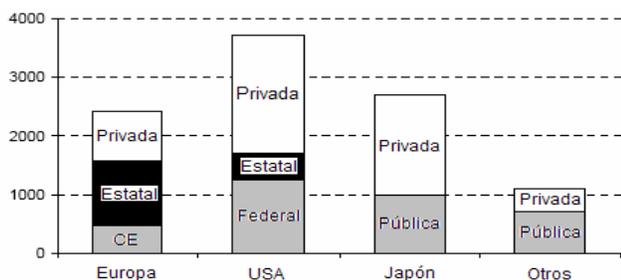
Figura 14. Inversión pública anual en nanotecnología (1997-2005).

Para tener una perspectiva concreta en cifras vale la pena mencionar que la National Nanotechnology Initiative, lanzada por el presidente Clinton en el 2000, recibió en el 2007 cerca de US \$ 1200 millones de dólares en presupuesto y que desde su fundación ha recibido aproximadamente US \$ 6500 millones. A nivel del país, el Centro de Excelencia

⁵ En solo los Estados Unidos la producción de nanotubos se estima en 2,5 toneladas métricas por día.

en Nuevos Materiales (CENM) recibirá cerca de dos millones de dólares para invertirlos entre 2005 y 2010 en investigación en esta área.

Cuando se tiene en cuenta la inversión privada en nanotecnología las cifras son aún más sorprendentes. En un solo año, en el 2005, la inversión mundial alcanzó los diez mil millones de dólares (US \$ 10.000). En los Estados Unidos la inversión privada es superior a la pública (estatal y federal) y lo mismo ocurre en Japón (figura 15).



Fuente: (European Commission, 2005).

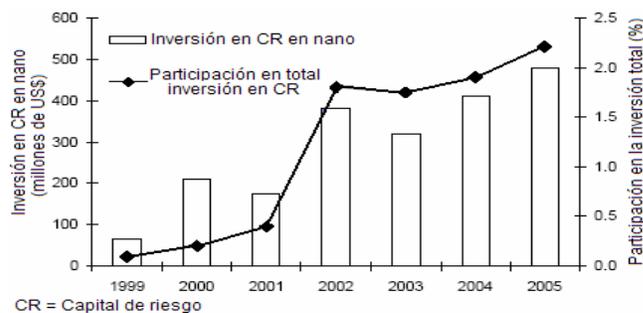
Figura 15. Inversión pública y privada en nanotecnología (2005).

Cuando se discrimina esta inversión por países en Europa, nuevamente se aprecia una concentración de recursos en dos de ellos: Alemania y el Reino Unido, con inversiones cercanas a los US \$ 200 millones de dólares anuales entre el 2003 y el 2005. Por otra parte, la inversión anual total que hizo la Unión Europea en nanotecnología (un poco más de US \$300 millones en el 2005) fue la cuarta parte de la inversión pública norteamericana en este campo en el mismo año (US \$ 1200 millones).

Pero en donde mejor se puede sentir la confianza del sector privado en el desarrollo promisorio de una industria, es a través del capital de riesgo que se invierte. Aquí, nuevamente las cifras sorprenden. A nivel mundial, entre 1999 y 2005 se destinaron un poco más de US 2000 millones de dólares como apuesta al desarrollo de productos en nanotecnología (figura 16).

Esta gráfica muestra que hubo un punto de inflexión en el 2002 en donde los empresarios del capital de riesgo disminuyeron su inversión. Es probable que esta decisión haya sido el resultado de los primeros estudios públicos sobre posibles efectos nocivos para la salud humana de las nanopartículas. Sobre este importante punto se volverá más adelante.

En los Estados Unidos, por su parte, la inversión de capital de riesgo se multiplicó por ocho en los últimos tres años del siglo anterior. Esta inversión se ha sostenido a

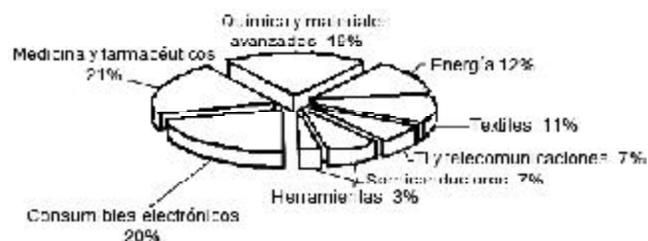


Fuentes: Anquetil (2005); Lux Research (2006).

Figura 16. Capital de riesgo en nanotecnología a nivel mundial (1999-2005).

pesar de que tan solo el 9% de los proyectos financiados con capital de riesgo había tenido éxito en el 2005; 83% continuaban operando y el 8% había fracasado. Vale la pena resaltar que los inversionistas norteamericanos invierten seis veces más dinero que sus colegas europeos lo cual marca una clara diferencia cultural, de espíritu empresarial, al respecto (Científica, 2005).

¿Pero en qué áreas de la nanotecnología invierten los empresarios? La figura 17 indica que la mayor cantidad de inversiones de capital de riesgo se está dirigiendo hacia el sector médico y el farmacéutico, así como hacia los de la electrónica, la química y los nuevos materiales.



Fuente: (Científica, 2005).

Figura 17. Distribución del capital de riesgo por área de aplicación (2005).

Pero invertir en estas tecnologías parece tener un riesgo, según lo han intuido los empresarios y por esta razón es probable que la inversión no haya sido mayor en los últimos años. ¿Qué tan reales son estos riesgos? La sección que sigue se ocupa de abordar en detalle este tema.

Riesgos

La esencia de la nanotecnología radica en la manipulación de objetos de tamaño tan pequeño que podrían con facilidad penetrar nuestra piel o inhalarse sin que pudiesen ser percibidos. Una vez en nuestro torrente sanguí-

neo podrían burlar al sistema inmunológico, penetrar las células y alojarse en órganos con potenciales efectos cancerígenos aún no estudiados (**Tomson et al.**, 2002).

De hecho, la baja inversión en proyectos de investigación asociados con el impacto ecológico, social y de salud que se desprende del trabajo en nanotecnología es una de las principales fuentes de preocupación de las instituciones gubernamentales y de las ONGs medio-ambientalistas (**Reynolds**, 2001).

Al considerar la nanotecnología como un sistema productivo, los riesgos pueden surgir en diferentes fases del proceso de producción. Pueden ocurrir fugas de materiales con potencial daño en las fábricas, los laboratorios, las bodegas de almacenamiento o durante el transporte de insumos o productos terminados. Estas fugas pueden afectar a los propios trabajadores o difundirse al medio ambiente en donde podrían contaminar el aire, la tierra y las fuentes de agua. Desde allí podrían entrar en la cadena alimenticia y terminar afectando al resto de la población.

Además de existir riesgos en el proceso mismo de elaboración de nuevos materiales, es necesario tener en cuenta los riesgos de los efectos secundarios que pueden traer el uso de los productos de la industria. El reciente escándalo mundial de una multinacional de juguetes que debió recoger cientos de miles de sus productos debido a los residuos de plomo de una pintura usada para recubrirlos, es tan solo un ejemplo del tipo de riesgo asociado con la industria de la nanotecnología.

Aunque parezca todavía parte de la ciencia ficción (y vale la pena recordar que en este campo estuvo la propia nanotecnología cincuenta años atrás), la creación de procesos de auto-replicación para la elaboración masiva de nuevos materiales puede ser otro riesgo latente. En efecto, a partir del estudio de cómo los seres vivos a escala muy pequeña operan como fábricas de producción – por ejemplo el funcionamiento de las células y los procesos de síntesis de proteínas – se ha planteado la posibilidad de construir fábricas de nuevos materiales que operen autónomamente a esta escala. La posibilidad de que éstas se salgan de control y provoquen accidentes de proporciones catastróficas es lo que algunos han llamado el pequeño riesgo del gran desastre (**Foresight Institute**, 2000).

Por otra parte, la nanotecnología hará posible la aplicación de terapias que pueden afectar la diversidad genética (al permitir la manipulación de genes) o de métodos de vigilancia que han sido éticamente cuestionados al afectar la privacidad. Por ejemplo la construcción de insectos me-

cánicos que portan cámaras minúsculas de vigilancia (**Foresight Institute**, 2000).

Para seguir en el ámbito de lo ético, la concentración del desarrollo de la nanotecnología en unos cuantos países, como se ha mostrado en las secciones anteriores, generará otra brecha importante entre países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo. En otras palabras, los beneficios de la nanotecnología estarán a disposición de los países en desarrollo solamente si su uso se mantiene abierto. Pero, como ya se vio, el financiamiento del sector privado ya superó con creces la inversión pública en el desarrollo de nuevos productos. Esto llevará a una presión cada vez mayor de las grandes multinacionales por fortalecer la legislación de la propiedad intelectual sobre estos productos y los procesos y tecnologías asociadas.

Por supuesto que es importante defender la propiedad intelectual, pero cuando estas patentes se solicitan sobre moléculas debe haber por lo menos un amplio debate sobre los límites razonables a la propiedad intelectual en este terreno. Hoy en día existen varias patentes sobre la molécula C60 que tiene un gran potencial de aplicación para la liberación controlada de drogas.

Dentro del mismo debate ético se circunscribiría el empleo de la nanotecnología en el campo de las aplicaciones militares. La carrera armamentista internacional se inició hace ya varios años de manera acelerada. Los siguientes son algunos hechos que reflejan la seriedad con que los países industrializados están compitiendo en este tema (**Reynolds**, 2001).

- Estados Unidos invirtió 125 millones de dólares en investigación sobre aplicaciones militares de la nanotecnología en el 2001; cuatro años después, la inversión ascendió a 275 millones de dólares;
- En el 2005 se creó el Institute of Soldier Nanotechnologies en MIT con un presupuesto de US \$50 millones de dólares para cinco años;
- El ministerio de defensa del Reino Unido, por su parte, tiene desde el inicio del milenio un presupuesto público de 1,5 millones de libras para este tipo de investigación;
- Suecia dedicó 11 millones de euros para financiar siete proyectos en investigación militar recientemente;
- La Unión Europea lanzó en el 2004 un programa de 60 millones de euros dedicado a financiar proyectos sobre protección contra el terrorismo asociado con productos de la nanotecnología.

La existencia de todos estos riesgos potenciales justifica las protestas y la preocupación de grupos ecológicos y de otras ONG sobre el futuro de la nanotecnología.

Regulaciones

La propuesta de regulación más conocida en este tema proviene de un trabajo adelantado por el Foresight Institute. El documento se elaboró como colofón de un taller patrocinado por esta institución y por el Institute for Molecular Manufacturing (IMM) que se realizó entre el 19 y el 21 de febrero de 1999 en Monterrey, California. El documento contiene algunos supuestos, principios y recomendaciones para un “desarrollo responsable de la nanotecnología molecular” (Foresight Institute, 2000).

Por la misma época el gobierno británico le solicitó a la Royal Society y la Royal Academy of Engineering que estudiaran el tema. El reporte que produjeron conjuntamente concluyó, en primer término, que existía muy poca información sobre el efecto de las nanopartículas en los seres vivos y en el medio ambiente. Igualmente, señalaron que tampoco había suficiente información sobre cómo se transmite este efecto a lo largo de las cadenas alimenticias.

El estudio hace tres grandes recomendaciones: a) que las fábricas y los laboratorios de investigación consideren la manufactura de nanopartículas y nanotubos como un proceso de alto riesgo; b) que se prohíba el uso de nanopartículas libres en aplicaciones medio-ambientales; y c) que se dediquen recursos suficientes para adelantar investigaciones sobre el potencial efecto nocivo de las aplicaciones de nanotecnología para la salud y el medio ambiente.

Otro aspecto relacionado con el tema de la regulación tiene que ver con la normalización y estandarización de procesos. Estas normas ayudan a coordinar los esfuerzos de diferentes instituciones en todo el mundo, facilitan la comercialización de los productos derivados de la nanotecnología e impulsan un aseguramiento de la calidad de estos productos.

En este sentido el papel del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST) del Departamento de Comercio de los Estados Unidos ha sido bien importante. Con un presupuesto inicial de US \$8 millones de dólares en el 2000, que se incrementó a US \$43 millones en el 2003, el NIST ha desarrollado normas para aplicaciones en semiconductores, comunicaciones y salud. Igualmente ha expedido directrices y herramientas para la visualización y caracterización a escala nanométrica, aspectos importantes para regular la investigación práctica en el campo (Valdés, 2001).

Un futuro posible en el 2015

Factores de cambio

En un taller de expertos realizado en Madrid en el 2006, con el apoyo financiero de la Unión Europea, se planteó la pregunta de los factores de cambio (Fundación de la Innovación Bankinter, 2006). Estos son todos aquellos aspectos que a futuro podrían afectar el desarrollo de la nanotecnología. Los expertos coincidieron en que los principales agentes aceleradores del desarrollo del mercado en nanotecnología serán los que conforman la tríada: universidad – gobierno – empresa. Las primeras, a través de la formación del capital humano y la investigación de punta en sus centros de investigación y laboratorios. Los segundos, mediante políticas que estimulen su desarrollo y una financiación continua que lo apalanque, y los empresarios, con la inversión y experiencia en gestión de procesos de producción para transformar el conocimiento adquirido en productos de impacto masivo.

Los factores que, a juicio de estos expertos, pueden acelerar el desarrollo futuro de la nanotecnología se agrupan en tres categorías: a) científico-tecnológicas (capacidad para crear herramientas que manipulen estructuras a escala atómica, poder aplicar en el mundo real los descubrimientos del “mundo nano”, y programas de formación interdisciplinarios); b) de costos (reducir costos de producción y disminuir el costo de las herramientas para construir nanoestructuras); y c) de acción gubernamental (políticas gubernamentales que impulsen la innovación, mejorar los procesos de patentes para agilizar la transferencia de resultados de la investigación a la industria, y lograr que los actores institucionales compartan recursos de infraestructura). Los expertos consideran que el acelerador de mayor importancia y que con seguridad ocurrirá, será el incremento en la capacidad para crear herramientas que manipulen estructuras a escala atómica.

De manera análoga, los factores que a juicio de estos expertos podrían frenar el desarrollo de la nanotecnología se clasifican en tres tipos de barreras: a) financieras (falta de inversión pública y privada, falta de infraestructura y una dispersión en la inversión entre los diferentes sectores); b) de cooperación (entre universidades y empresas, y entre países y regiones); y c) político-sociales (presión social para evitar efectos perjudiciales o no éticos derivados de la nanotecnología y falta de una regulación específica). Teniendo en cuenta el nivel de importancia adscrito a cada uno de estos factores y su probabilidad de ocurrencia, una reducción en la inversión (pública y privada), así como la falta de una infraestructura apropiada, son las principales barreras que deben evitarse.

Aplicaciones posibles

Estos mismos expertos (**Fundación de la Innovación Bankinter, 2006**) consideran que los países desarrollados deben centrar sus esfuerzos en la elaboración de productos derivados de la nanotecnología para apoyar principalmente el desarrollo de la industria farmacéutica, el monitoreo de pacientes y la generación de energía (ver figura 18).

Por otra parte, los mismos expertos consideran que los países en vías de desarrollo deberían centrar sus esfuerzos en aplicaciones de la nanotecnología que los ayuden al desarrollo de la agricultura, el tratamiento del agua, la lucha contra los factores de enfermedades y la detección de plagas, así como en el almacenamiento y procesamiento de alimentos.

En general, la nanotecnología puede ser utilizada para responder a una gran variedad de problemas sociales. Entre los más importantes se encuentran los siguientes:

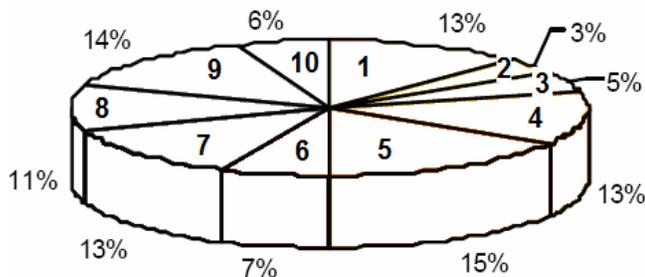
- La escasez de agua es un problema serio y se pronostica que se incrementará. La mayor parte del consumo del agua se utiliza en los sistemas de producción y agricultura, algo que la fabricación de productos mediante la fabricación molecular podría transformar.
- Las enfermedades infecciosas causan problemas en muchas partes del mundo. Productos sencillos como tubos, filtros y redes de mosquitos podrían reducir este problema.
- La información y la comunicación son herramientas útiles, pero en muchos casos ni siquiera existen. Con la nanotecnología, los ordenadores reducirían considerablemente su costo.
- Muchas regiones todavía carecen de energía eléctrica. Pero la construcción eficiente y barata de estructuras

ligeras y fuertes, equipos eléctricos y aparatos para almacenar la energía permitirían el uso de energía termal solar como fuente primaria y abundante de energía.

- El desgaste medioambiental es un serio problema en todo el mundo. Nuevos productos tecnológicos permitirían que las personas viviesen con un impacto medioambiental mucho menor.
- La nanotecnología molecular podría fabricar equipos baratos y avanzados para la investigación médica y la sanidad, haciendo mucho mayor la disponibilidad de medicinas más avanzadas.
- Agricultura y alimentación (abonos, plagas, pesticidas).

Por otra parte, y dejando de lado las aplicaciones militares, algunos de los productos derivados de la nanotecnología que se prevé que afectarán directamente nuestro estilo de vida serán los siguientes (**Fundación de la Innovación Bankinter, 2006; Coates, 1999**): gafas que no se rayan, parabrisas que se limpian solos, prendas de vestir que no se arrugan ni se manchan, equipamiento deportivo que ayuda a ser más competitivo (como el reciente traje de baño que ha permitido el rompimiento de 30 marcas mundiales), productos cosméticos más eficaces y protectores, computadores más rápidos y eficientes con nanoprocesadores que consumen menos energía y disminuyen los costos por compuerta, dispositivos de almacenamiento de información más ligeros y pequeños con capacidades en el orden de los Tb, mil veces más eficientes que los actuales, lubricantes producidos a partir de nanopartículas esféricas inorgánicas que proporcionen una lubricación más durable que los sólidos convencionales con aditivos.

Una vez identificados los productos más promisorios que pueden obtenerse a futuro como resultado del desarrollo de la nanotecnología surge una pregunta obvia: ¿cuál es el mercado para todos estos productos?



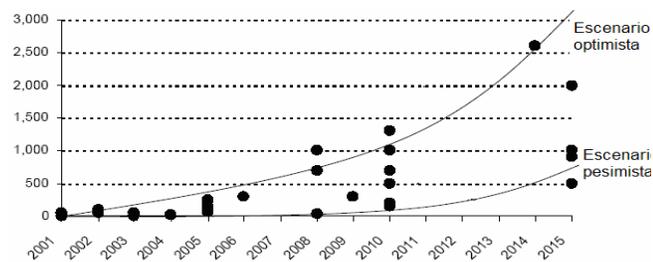
1 Energía	2 Agricultura
3 Tratamiento de agua	4 Diagnóstico de enfermedades
5 Sistema de reparto de medicamentos	6 Almacenamiento y proceso de alimentos
7 Remedio a la contaminación del aire	8 Construcción
9 Seguimiento del paciente	10 Vector de enfermedad y control de detección de peste

Fuente: Fundación de la Innovación Bankinter (2006).

Figura 18. Áreas prometedoras para el avance de la nanotecnología en los países desarrollados.

Mercado potencial

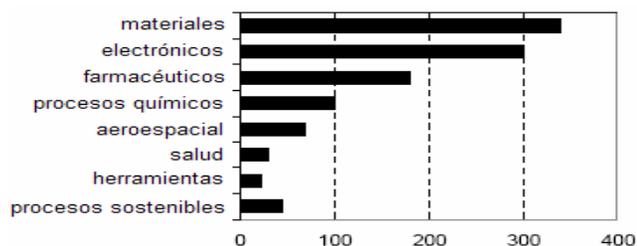
El mercado mundial esperado en nanotecnología para las siguientes dos décadas se ha estimado en cerca de 800 billones de dólares en el escenario más pesimista, y en cerca de tres mil billones de dólares en el más optimista. La evolución prevista de este mercado se aprecia en la gráfica de la figura 19.



Fuentes: NSF (2001).

Figura 19. Mercado esperado en nanotecnología en el mundo (2008-2015) [billones de dólares].

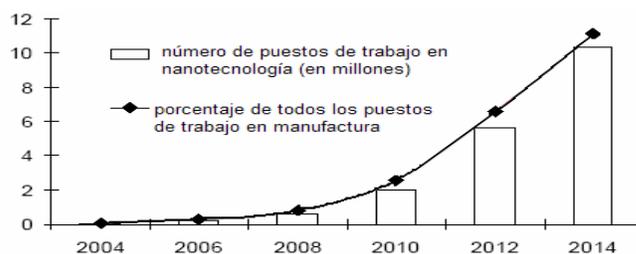
Si se observa el comportamiento del mercado mundial por áreas de aplicación se encuentra que el mercado de los nanomateriales y el de los productos en electrónica serán los de mayor importancia en la próxima década (figura 20). Mientras que éste se estima que tendrá un mercado de 300 billones de dólares en el 2015, aquél alcanzará los 350 billones de dólares en el mismo año. Este comportamiento del mercado, hace de esta área del desarrollo tecnológico un campo promisorio en el país, como una potencial herramienta de desarrollo social.



Fuente: Lux Research (2004).

Figura 20. Distribución del mercado mundial según áreas de aplicación de la nanotecnología (proyección al 2015, cifras en billones de dólares).

Para poder responder a esta demanda potencial de productos derivados de la nanotecnología se estima que para el año 2014 habrá una necesidad de cerca de 11 millones de vacantes para trabajar en este campo (figura 21). Esta proyección abre una valiosa oportunidad para crear progra-

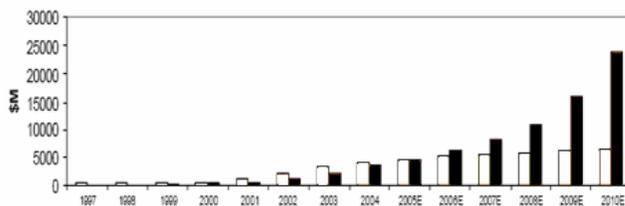


Fuente: Lux Research (2004).

Figura 21. Proyección de nuevos puestos creados para trabajar en nanotecnología.

mas de formación de profesionales y técnicos con los particulares perfiles que se requerirán para asumir estos nuevos puestos de trabajo.

De la misma manera se espera que la inversión pública y privada en nanotecnología continúe creciendo de manera exponencial hasta alcanzar los US \$25000 millones de dólares en el 2010 (figura 22). Es muy probable que mientras que la inversión pública se mantenga constante, la privada sea la que crezca exponencialmente.



Fuente: Científica (2005).

Figura 22. Proyección de la inversión pública y privada en nanotecnología (1997-2010).

Es igualmente probable que los sectores en los que se tendrá mayor influencia con productos derivados de la nanotecnología en el 2015 sean la comunicación, la higiene, el trabajo y el transporte. Los sectores con un menor impacto esperado serán el descanso, los deportes y el tiempo libre.

Por otra parte, se estima que en los próximos cinco años el sector que llevará el liderazgo será el de los nanomateriales seguido por el de la electrónica y el de las telecomunicaciones. A mediano plazo (en diez años) se espera que la electrónica y el sector farmacéutico sigan en la cresta del desarrollo nanotecnológico pero el cambio más significativo se prevé que será en las aplicaciones al medio ambiente y a la salud.

Nanomateriales: ¿quo vadis?

Los nanomateriales o el diseño y producción de nuevos materiales es una de las grandes áreas de trabajo de la

nanotecnología y una de las de mayor desarrollo promisorio por el impacto inmediato que puede tener en el desarrollo industrial y en la vida cotidiana.

Estado del arte

Así como fue posible identificar algunos hitos importantes en el desarrollo de la nanotecnología, es posible también indagar por hitos equivalentes que marcaron el desarrollo de nuevos materiales. Un rápido recuento destacaría los siguientes eventos:

- En 1855 Bessemer patenta la fabricación barata del acero. Este es el inicio de la era moderna de las grandes estructuras;
- En 1939 aparece el desarrollo comercial del nylon que es fundamental para la evolución de los plásticos;
- En los años 50 se desarrollan las aleaciones de alta temperatura basadas en Níquel las cuales tienen un fuerte impacto en el desarrollo de las turbinas;
- En la década de los 60 se perfecciona la capacidad de crecer estructuras micrométricas sobre Si dando nacimiento a la microelectrónica;
- En los años 80 aparecen los superconductores de alta temperatura crítica lo que permite el desarrollo de materiales cerámicos;
- Finalmente, en el nuevo milenio, la nanotecnología recibe un fuerte impulso haciendo realidad la manipulación de materiales a escala nanométrica.

Existen dos métodos para la elaboración de nuevos materiales desde la perspectiva de la nanotecnología. El más desarrollado por haber sido el primero sigue una aproximación de “arriba hacia abajo” (top down). La litografía es uno de ellos y ha sido la manera más común de fabricar los circuitos integrados para la industria computacional. El segundo método es el opuesto, de “abajo hacia arriba” (bottom up) que fue el método sugerido por Feynman en su célebre conferencia de finales de los años 50 del siglo anterior. Este método parte de la posibilidad de manipular la materia a escala atómica. Hay tres técnicas para hacerlo: la síntesis química, el auto-ensamblaje, y el ensamblaje posicional. Aunque opuestos en su concepción y técnicas, los dos métodos han venido convergiendo en los últimos años.

La investigación actual de nuevos materiales puede clasificarse de diversas maneras. Una primera clasificación reconoce las siguientes doce áreas: 1) materiales nanoestructurados; 2) nanopartículas y nanopolvos; 3)

nanocápsulas; 4) materiales nanoporosos; 5) nanofibras; 6) fullerenos; 7) nanoalambres; 8) nanotubos; 9) dendrímeros; 10) electrónica molecular; 11) puntos cuánticos; y 12) películas delgadas.

La aplicación específica de los nuevos materiales es muy variada. Algunas de estas son las siguientes: la generación y almacenamiento de energía con la construcción de novedosas celdas solares; la producción de luces de estado sólidos (nueva generación de LEDs); la producción de nanopartículas que ayuden en la purificación del agua; el desarrollo de recubrimientos duros para herramientas industriales; nuevas herramientas para el avance de la opto-electrónica; nuevos materiales para almacenar información; materiales para construir sensores más sensibles, rápidos y a menor costo; entre otras.

Otras aplicaciones de gran impacto potencial de los nuevos materiales se encuentran en el campo de la medicina. En efecto, la mayor flexibilidad de los nanotubos de carbón, así como su resistencia, los posicionan como base ideal para la fabricación de huesos artificiales, prótesis y el tratamiento de enfermedades óseas como la osteoporosis. Igualmente se prevén aplicaciones en el tratamiento de tumores con la posibilidad de enviar dosis de drogas a órganos específicos utilizando dendrímeros como una especie de sistema de correo a través del torrente sanguíneo. Esta sería una forma más efectiva, por ejemplo, de tratar la diabetes.

La conocida ley de Moore en el desarrollo de la capacidad computacional también ha sido afectada por el avance vertiginoso de los nuevos materiales. La aparición de las populares memorias USB (memory flash devices) de almacenamiento masivo (4 gigabytes) en tamaños cada vez más reducidos (menos de cuatro centímetros de largo, menos de dos cm. de ancho y unos cuantos milímetros de grosor) revolucionaron a comienzo de siglo (y continúan haciéndolo) la industria computacional. Igualmente, y solo para ilustrar una reciente aplicación de distribución masiva, la miniaturización de equipos electrónicos como el IPOD son también el resultado directo del desarrollo de nuevos materiales. Por su parte, los riesgos que se describieron en la sección anterior sobre el desarrollo de la nanotecnología también están latentes para el campo de las aplicaciones de los nuevos materiales.

Nanomateriales por diseño

Es posible identificar dos estrategias para el desarrollo de nuevos productos basados en nanomateriales (**Technology Partnership Energetics**, 2003). La primera se basa en el descubrimiento de nuevas propiedades y sigue la siguiente secuencia de actividades:

- Descubrir novedosas nanoestructuras, nanopartículas y nanomateriales a través de un proceso científico de investigación exploratoria en una gran variedad de materiales;
- Determinar las propiedades de estos nanomateriales (químicas, físicas y biológicas);
- Identificar potenciales aplicaciones de valor;
- Indagar su viabilidad comercial;

El resultado de este proceso, en términos de impacto comercial, suele ser el desarrollo de nanomateriales con un mercado limitado.

La segunda estrategia se basa en un proceso de búsqueda de soluciones aplicadas a problemas concretos. La secuencia de actividades, en este caso, es la siguiente:

- Identificar problemas, necesidades o retos específicos en un dominio particular de aplicación (por ejemplo en agroindustria, en la construcción, en la energía, en la salud, etc.);
- Diseñar, producir y escalar nanomateriales que tengan las propiedades específicas que se requieren para resolver los problemas identificados;

En este caso, el resultado esperado es una gran diversidad de productos basados en nanomateriales que han sido diseñados específicamente para responder a necesidades y requerimientos concretos.

Los retos en la investigación

El desarrollo de nanomateriales por diseño requiere del desarrollo en diferentes frentes de investigación. A continuación se mencionan cuatro áreas de investigación interdisciplinaria e interrelacionada:

- La comprensión de la química y la física al nivel nano;
- El desarrollo de modelos y técnicas de simulación;
- El desarrollo de herramientas para la observación y la manipulación;
- El desarrollo de procesos de manufactura

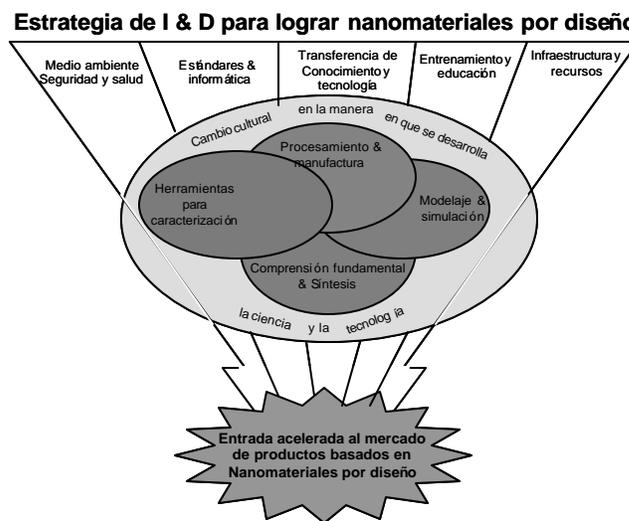
La estrecha relación entre estos frentes se ilustra con la gráfica de la figura 23.

Por otro lado, se pueden identificar cinco líneas adicionales que permiten asegurar el desarrollo productivo de los descubrimientos y diseños basados en nanomateriales.

Estas líneas se centran en la investigación y el desarrollo de actividades en:

- El impacto ambiental, para la salud y la seguridad ciudadana del desarrollo de los nanomateriales por diseño;
- El desarrollo de estándares que permitan el avance coordinado del campo;
- Formas de transferencia de conocimiento y tecnología entre investigadores y centros de investigación;
- Formas de enseñanza para la preparación del recurso humano necesario para impulsar el desarrollo de este campo del conocimiento;
- La conformación de una red de recursos e infraestructura que posibiliten el desarrollo de los nanomateriales por diseño.

La meta del avance simultáneo en estos nueve frentes de investigación y acción deberá ser el desarrollo acelerado de productos basados en nanomateriales con alto impacto práctico en los ámbitos de aplicación seleccionados (ver figura 23).



Fuente: Technology Partnership Energetics (2003).

Figura 23. Nueve frentes de investigación-acción en el campo de los nanomateriales por diseño.

A mediados del 2003 el Departamento de Energía de los Estados Unidos organizó un taller para determinar y priorizar los retos de investigación y acción futura en estos nueve frentes de trabajo en nanomateriales por diseño.

ño. Al taller asistieron 96 representantes de la industria, el gobierno, los centros de investigación y las universidades. El taller arrojó como resultado los 32 retos que se observan en el cuadro de la figura 24.

El centro de excelencia en nuevos materiales –CENM–

En el país, diversos grupos de investigación e investigadores, en la última década, han orientado sus esfuerzos investigativos en el área de la nanotecnología y los nuevos materiales. Recientemente, algunos de estos grupos han aunado su conocimiento y esfuerzo alrededor de esta temática, en torno a un Centro de Excelencia en Nuevos Materiales⁶. Esta unión constituye una alternativa para el desarrollo de nuevas tecnologías en Colombia enfocadas en la estudio y creación de nuevos materiales de dimensiones nanométricas. Hace parte de un esfuerzo nacional de alta prioridad apoyado por COLCIENCIAS y las Universidades del país a las cuales pertenecen 19 reconocidos grupos de investigación multidisciplinaria⁷.

El CENM busca desarrollar programas de investigación en ciencias de los materiales, física de la materia condensada, química de los materiales e ingeniería de materiales, a través de los cuales se formen científicos e ingenieros a niveles de pregrado, maestría y doctorado, así como proveer estancias de post-doctorado en estas áreas. Con lo anterior se busca realizar una transferencia de tecnología a la industria Colombiana.

Con base en la experiencia adquirida por estos grupos, el CENM ha definido cuatro temas de investigación interdisciplinaria: recubrimientos avanzados; materiales nanocompuestos; nanomagnetismo; y dispositivos de estado sólido, sensores y sistemas mesoscópicos. Una breve descripción de cada una de estas líneas se presenta a continuación.

Materiales de recubrimientos: su propósito es desarrollar nuevos materiales con mejorada resistencia a difíciles condiciones de corrosión, desgaste y alta temperatura. Se basa en el estudio de diferentes tipos de procesos y materiales, tanto desde el punto de vista científico como tecnológico, con el fin de controlar y ajustar sus propieda-

des. Dentro de los sistemas a considerar están los recubrimientos compuestos (como nanopartículas de SiC y diamante en matrices de Ni y Ni-Cr, y partículas nanométricas de óxidos de hierro en Ni-P) y recubrimientos de multicapa (como W/WC y CN_x/ZrN).

Materiales nanocompuestos: busca producir y evaluar nanopulvos activos, obtenidos de desechos y subproductos industriales, para fabricar materiales cementantes de alto rendimiento mecánico y durabilidad para aplicaciones en la construcción de viviendas y en el desarrollo de la infraestructura civil en Colombia. Estos nuevos materiales contribuirán a la sostenibilidad ambiental al disminuir el uso de recursos minerales, reducir la contaminación ambiental e incrementar su vida útil.

Nanomagnetismo: el confinamiento y los efectos de tamaño finito alteran las propiedades magnéticas de los materiales. Recientemente ha sido revelado que estos efectos de tamaño finito pueden ser empleados para nuevas aplicaciones magnéticas, como en dispositivos espintrónicos. Esta línea busca entender los comportamientos magnéticos de bloques de construcción individuales que eventualmente serán insertados dentro de estructuras más complejas para efectuar nuevas funciones.

Dispositivos de estado sólido, sensores, y sistemas mesoscópicos: se busca diseñar dispositivos optoelectrónicos, sensores no convencionales y nanodispositivos enfocándose en semiconductores cuaternarios, cristales iónicos y óxidos de tipo perovskita basados en Mn, Sn y Mo. Se estudian las propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas de estos materiales. En particular el efecto de la reducción de la dimensionalidad y la presencia de confinamientos y topologías no triviales en las propiedades de transporte de portadores confinados en dispositivos nano y mesoscópicos. También se estudian las propiedades ópticas de dispositivos asociados con impurezas y los estados excitónicos bajo la acción de perturbaciones externas. Se examina el efecto Raman en puntos cuánticos ensamblados, el efecto Overhouser, polaritones en microcavidades semiconductoras, y el efecto de un láser de alta densidad sobre iones y moléculas para predecir los espectros de fotoionización y foto-detachment.

6 La página institucional del centro es la siguiente: www.cenm.org.

7 Estos grupos forman parte de las siguientes universidades: Universidad del Valle, Universidad del Tolima, Universidad del Quindío, Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad Nacional de Colombia, Universidad Industrial de Santander, Universidad del Cauca, Universidad Autónoma de Occidente, Universidad del Norte y Universidad de Antioquia. El CENM tiene estrechas relaciones con algunos centros de investigación internacionales como: The Nanotechnology Center (Northwestern University), The Thin Film and Nanoscience Group, The Department of Civil and Environmental Engineering (University of Michigan), y el Centro para la Investigación Interdisciplinaria Avanzada en Ciencias de los Materiales (CIMAT) de Chile.

Construcción de una agenda prospectiva

En concordancia con las prioridades y retos en la investigación de los nueve frentes de trabajo en nanomateriales por diseño (Figura 24), planteadas por la Technology Partnership Energetics (2003), el CENM planteó la agenda temática de prospectiva en nanomateriales. La agenda se propone a través de proyectos propuestos por el Centro para ser adelantados en los próximos años.

De los 32 retos de investigación planteados en el escenario de referencia, los investigadores del CENM seleccionaron 19. Se seleccionaron 3 retos como eje central de las actividades del CENM:

- **Desarrollo de una comprensión fundamental de las relaciones entre estructura y propiedades en la nanoescala.** Las propiedades de los nanomateriales son una función de su tamaño. Actualmente esta relación no puede predecirse apropiadamente para todas las variaciones de tamaño. Esto requerirá una mejor comprensión de las leyes que gobiernan el escalamiento físico de los materiales. Tampoco se comprende cabalmente, en este momento, el impacto que tiene la composición de las nanopartículas, ni la estructura de su superficie sobre las propiedades físicas y químicas. Lograr esta comprensión es necesario para el desarrollo de la estrategia de nanomateriales por diseño.
- **Desarrollo de una base de datos con los métodos para sintetizar y ensamblar nanomateriales que realizarán funciones predeterminadas en aplicaciones específicas.** Es imprescindible desarrollar un buen número de técnicas en tiempo real que permitan acelerar los procesos de síntesis de nuevos materiales con una estructura, función y nivel de pureza deseada. Estas técnicas deben estar rigurosamente documentadas de tal manera que puedan ser utilizadas como prácticas estándares tanto en los laboratorios de investigación como en las empresas de producción.
- **Implementar estrategias para atraer y preparar una fuerza de trabajo adecuada para la investigación y la manufactura de nuevos materiales.** La formación de investigadores, ingenieros y técnicos que dominen los fundamentos básicos de las diferentes disciplinas desde donde opera la nanotecnología y que, además, tengan las habilidades para poder diseñar y manipular la materia a escala nanométrica utilizando los instrumentos del sector, es fundamental para el impulso de los nanomateriales por diseño.

Los 9 retos a ser implementados por diversos grupos consisten en:

- **Desarrollar modelos, teorías y formas de validación experimental de las propiedades físicas y químicas en la nanoescala, incluyendo los principios cinéticos y termodinámicos que guían los procesos de síntesis y ensamble.** Es necesario comprender, con precisión, los límites cinemáticos y termodinámicos de los diferentes procesos de ensamble de nanomateriales, así como las implicaciones que estos tienen para los procesos de escalamiento de tamaño. Es probable que en muchas ocasiones los procesos de síntesis y de ensamble deban ocurrir en un solo proceso.
- **Desarrollar nuevos paradigmas para crear bloques primarios (“building blocks”) basados en la comprensión de la física y la química en la nanoescala.** Actualmente, el desarrollo sintético de los nuevos materiales se hace a través de un proceso heurístico ineficiente. Desarrollar métodos de síntesis que sean reproducibles y en los que la composición, los defectos, el tamaño y el orden de ensamblaje sean variables controlables vía nuestra comprensión de los principios físicos y químicos que los regulan, permitirá el diseño y fabricación de nuevos materiales con mayores oportunidades de éxito comercial.
- **Determinar el desempeño de los nanomateriales en la escala de trabajo de los laboratorios.** Este es un servicio que deben prestar cada vez con mayor precisión y celeridad los laboratorios para acelerar la comercialización de los productos que contienen componentes nanomateriales. Es muy probable que durante algún tiempo los productos que se fabriquen usen los nuevos materiales bajo los criterios actuales de diseño. Sin embargo, la meta es desarrollar un sistema de trabajo en donde las propiedades únicas de los nuevos materiales guíen el diseño de los nuevos productos.
- **Desarrollar procesos de dispersión y modificación de superficie que preserven la funcionalidad.** A menudo, una vez que un nanomaterial es producido (nanopartícula o nanotubo) debe ser modificado para poder ser utilizado en diversas aplicaciones. En estos casos, la preservación de las propiedades magnéticas, electrónicas, mecánicas y demás que le son únicas, es crucial. Es necesario el desarrollo de técnicas de diseño y de manipulación que permitan el escalamiento adecuado de los componentes nanomateriales y de los productos que los usan, manteniendo estas propiedades y asegurando que el proceso siga siendo

Comprensión fundamental y síntesis	*	Desarrollo de una comprensión fundamental de las relaciones entre estructura y propiedades en la nanoescala
	*	Desarrollar modelos, teorías y formas de validación experimental de las propiedades físicas y químicas en la nanoescala, incluyendo los principios cinéticos y termodinámicos que guían los procesos de síntesis y ensamble.
	*	Desarrollar nuevos paradigmas para crear bloques primarios (“building blocks”) basados en la comprensión de la física y la química en la nanoescala.
	*	Desarrollar nuevos paradigmas y estrategias de diseño para el ensamblaje controlado de nanocompuestos y resolver espacialmente nanoestructuras con grandes órdenes de alcance (“long-range order”)
	*	Desarrollar nuevos métodos de escaneo para determinar las relaciones entre estructura y propiedades.
	*	Determinar el desempeño de los nanomateriales en la escala de trabajo de los laboratorios.
	•	Desarrollo de una base de datos con los métodos para sintetizar y ensamblar nanomateriales que realizarán funciones predeterminadas en aplicaciones específicas.
Procesamiento y manufactura	*	Desarrollar unidades operacionales y métodos robustos para escalar hacia arriba y hacia abajo en los procesos de manufactura.
	*	Desarrollar novedosas técnicas de manufactura para un ensamblaje jerárquico.
	*	Desarrollar procesos de dispersión y modificación de superficie que preserven la funcionalidad.
	•	Desarrollar procesos de monitoreo y control para asegurar la consistencia de los productos nanomateriales.
	•	Desarrollar procesos que permitan integrar los nuevos materiales con aparatos existentes manteniendo las propiedades de nanoescala.
	–	Desarrollar la habilidad para remover impurezas en los insumos precursores para cumplir con las especificaciones de sus aplicaciones.
Herramientas para caracterización	*	Desarrollar métodos de caracterización en tiempo real y herramientas para la investigación y manufactura.
	•	Desarrollar la infraestructura necesaria para crear herramientas y procesos de manufactura.
Modelaje y simulación	*	Desarrollar modelos fundamentales para predecir con exactitud la formación de nanoestructuras.
	*	Desarrollar métodos para relacionar modelos entre escalas de tamaño.
	•	Mejorar la capacidad de investigación para apoyar el desarrollo de modelos.
Medio ambiente, seguridad y salud	*	Evaluar los impactos sobre la salud y el impacto en el medio ambiente.
	*	Determinar el potencial de impacto de la exposición de materiales en la escala nano.
	*	Establecer guías adecuadas para la operación de productos basados en nanomateriales.
Estándares e informática	*	Desarrollar procesos estándares para la síntesis de nanomateriales.
	*	Desarrollar un conjunto de materiales de referencia para estandarizar la medición de propiedades.
	*	Desarrollar métodos estándares para evaluar las propiedades físicas y químicas.
	*	Desarrollar estándares computacionales para mejorar el procesamiento y transferencia de información para modelar y simular.
	*	Desarrollar estándares para evaluar los materiales en sus aplicaciones.
	*	Establecer nomenclaturas estándares reconocidas internacionalmente.
	•	Establecer la infraestructura organizacional y otros requerimientos para impulsar el desarrollo de estándares.
Transferencia de conocimiento y tecnología	*	Establecer políticas para la transferencia de tecnología y el impulso de la comercialización.
	•	Construir una infraestructura que impulse compartir el conocimiento para facilitar la comprensión de la nanociencia e impulse su comercialización en el corto plazo.
Entrenamiento y educación	*	Implementar estrategias para atraer y preparar una fuerza de trabajo adecuada para la investigación y la manufactura de nuevos materiales.
	*	Promover el interés público y crítico por el desarrollo de la nanotecnología.

Rango de prioridad: Máximo * Alto • Medio –

Fuente: “Chemical industry R&D Roadmap for Nanomaterial by design”, Chemical Industry Vision 2020 Technology Partnership Energetics Inc., US Department of Energy, 2003.

Figura 24. Prioridades y retos en la investigación de los nueve frentes de trabajo en nanomateriales por diseño.

menos costoso que el de los productos sustitutos del mercado.

- **Desarrollar la habilidad para remover impurezas en los insumos precursores para cumplir con las especificaciones de sus aplicaciones.** Las aplicaciones de los nanomateriales suelen ser muy sensibles a las impurezas (por ejemplo en aplicaciones ópticas, electrónicas o médicas). Las técnicas actuales de remoción de impurezas a veces son demasiado costosas frente al valor marginal que se obtiene.
- **Desarrollar métodos para relacionar modelos entre escalas de tamaño.** Se necesitan modelos de predicción y de simulación que permitan relacionar las propiedades a nanoescala, a través del tiempo y de variaciones de tamaño, con algunas propiedades macroscópicas determinadas. Estos modelos facilitarán los procesos de diseño e ingeniería de los nuevos materiales.
- **Mejorar la capacidad de investigación para apoyar el desarrollo de modelos.** Para mejorar las técnicas y capacidades de modelaje y simulación es necesario desarrollar novedosas estrategias que permitan el trabajo mancomunado de diferentes expertos. Esto debe estar acompañado del mejoramiento de la capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos.
- **Desarrollar procesos estándares para la síntesis de nanomateriales.** El estado actual de la síntesis de los nuevos materiales es similar al que tenía la química orgánica hace casi un siglo. En aquella época era común que cada nuevo método de síntesis que era descubierto fuese publicado en la literatura especializada. Sin embargo, una compilación sistemática de métodos verificados de síntesis no existía. La publicación del compendio sobre "Síntesis Orgánica" para llenar este vacío resultó en un incremento exponencial tanto en la preparación como en el uso de los materiales orgánicos. Un crecimiento similar ocurrió en la química inorgánica con la publicación de los métodos validados de "Síntesis Inorgánica". Es de esperar que el desarrollo de métodos estándares de síntesis de nanomateriales tenga un efecto similar en esta época.
- **Promover el interés público y crítico por el desarrollo de la nanotecnología.** Es muy importante propiciar espacios de formación y discusión en colegios, escuelas, universidades y demás instancias de participación sobre los riesgos reales del desarrollo y empleo de los nuevos materiales. Es necesario desmitificar el tema y generar una conciencia pública bien informada.

A corto plazo, las actividades del CENM buscarán establecer lazos estrechos con la industria para impulsar proyectos conjuntos de investigación. Lo anterior requerirá por parte del CENM, impulsar políticas gubernamentales que identifiquen áreas comunes de interés para la industria y el gobierno en el tema de los nuevos materiales y buscar fuentes de financiación a través de la oferta de servicios y del apoyo directo de la empresa privada a la investigación del Centro.

Conclusiones

El estudio prospectivo que aquí se presenta permitió proveer de un referente conceptual a los investigadores del CENM para determinar los quince objetivos que enmarcarán su agenda de trabajo en la siguiente década. Esta agenda, sin embargo, debe alinearse con una agenda nacional en nanotecnología.

En efecto, se observa que los tres actores claves en el desarrollo mundial de este campo son los centros de investigación (y universidades), las empresas y el gobierno. La creación de los Centros de Excelencia ha propiciado una integración entre los primeros actores. La integración con el sector empresarial, sin embargo, es crucial si se decide seguir el paradigma de nanomateriales por diseño que se presenta en este artículo. Determinar cuáles son los principales problemas de mayor impacto nacional en los que podría aportar la nanotecnología es una tarea impostergable. Esta tarea debe ser impulsada por el Gobierno Nacional a través de Colciencias.

La respuesta a esta pregunta permitirá focalizar los escasos recursos gubernamentales de investigación con los que se cuenta, facilitar la inversión de recursos del sector privado e integrar los proyectos de investigación de las Universidades y Centros de Investigación. Esta sería la respuesta nacional, *mutatis mutandi*, a la pregunta inicial planteada en este artículo: Nanotecnología, ¿Quo Vadis?

Referencias

- Anquetil, P. 2005. The impact of nanotechnology, Susquehanna Financial group, June 2005.
- Científica, 2003. The Nanotechnology Opportunity Report.
- Científica, 2005 ¿"Where has my money gone?"
- Coates, J. 1999. "Looking ahead: Opportunities and consequences in science and technology", Research and Technology Management, Jan/Feb., p. 36-41.
- Fecht, H., Ilgner, J. Köhler, T., Mietke, S., Werner, M. 2003. Nanotechnology Market and Company Report – Finding Hidden Pearls, WMtech Center of Excellence Micro and Nanomaterials, Ulm. citado en <http://cordis.europa.eu/nanotechnology>

- Feynman, R. P.** 1959. "There is plenty of room at the bottom", en Engineering and Science, Instituto Tecnológico de California. (También puede obtenerse una copia en la siguiente URL: <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>)
- Foresight Institute 2000. "Foresight guidelines on molecular nanotechnology". Revised version 3.7, en <http://www.foresight.org/Iguidelines>
- Fuller, R. B.** 1979, "*Sinergetics: The Geometry of Thinking*", Macmillan, New York.
- Fundación de la Innovación Bankinter 2006. "La nanotecnología: la revolución industrial del siglo XXI", España.
- Grupo ETC 2003. "De los genomas a los átomos: la inmensidad de lo mínimo", www.etcgroup.org.
- Lux Research 2004. The Nanotech Report 2004.
- Lux Research 2006. Lux Research Report. Charts Shifts in Competitiveness as Winners and Losers Emerge in Nanotechnology, In: <http://www.prnewswire.com/cgi-bin/stories.pl?ACCT=104&STORY=/www/story/11-03-2005/0004207937&EDATE>
- Mansoori, A.** 2005. Principles of Nanotechnology, World Scientific Pub. Co.
- Mitsubishi Research Institute 2002. Cited by Kamel, S., Promoting Japanese-style Nanotechnology Enterprises, 2002.
- NSF 2001. NSF guide to programs Fiscal Year 2002 (NSF 02-03), Washington, D.C. p. 165.
- Park Cirlin, E.** 2004. "Overview of the Current status of Nanotechnology, Nanomaterials and their Applications". International Technology Associates. Los Angeles, California, UKC.
- Reynolds, G.H.** 2001. "Environmental regulations of nanotechnology", ELR News and Analysis, 6-2001. [Puede descargarse desde <http://www.wli.org>]
- Technology Partnership Energetics 2003, "Chemical industry R&D Roadmap for nanomaterial by design"; Chemical Industry Vision 2020; US. Department of Energy.
- Tomson, M.M., Wiesner, J., Hughes, C. and R. Smalley** 2002. "Nanomaterial fate and transport in the environment", NSF, EEC-0118007. [Puede descargarse desde www.cnst.rice.edu/cbnen/FateAndTransport.html]
- Valdés, J.** 2001. "La nanotecnología y el nuevo estudio del Comité internacional de Pesas y Medidas sobre las futuras necesidades en metrología".

Recibido: 5 de junio de 2008

Aceptado para su publicación: 7 de julio de 2008