

De la Nanociencia a la Nanotecnología: en las fronteras de la Física del Estado Sólido

José Ángel Martín Gago y Pedro A. Serena Domingo

La Nanociencia y la Nanotecnología son un conjunto de conocimientos teóricos y prácticos que nos permiten determinar como se comporta el denominado nanomundo (el ámbito en el que los tamaños de los objetos tienen entre 1 y 100 nm). A partir de estos conocimientos se están haciendo continuamente interesantes y arriesgadas propuestas sobre nuevos procedimientos, materiales y dispositivos que muy probablemente se convertirán en los bienes de consumo que inundarán nuestras casas, oficinas, hospitales, vehículos, etc. en las próximas décadas. En este artículo se realiza un breve repaso a algunas de estas propuestas (fullerenos, nanotubos de carbono, grafeno, virus, nanohilos, nanopartículas, etc.) con el fin de mostrar los temas de interés que motivan e impulsan la investigación de centenares de laboratorios de todo el mundo y que ilustran el gran potencial y la gran transversalidad de la Nanotecnología.

1. Introducción

Puede decirse que el comienzo de la Nanotecnología se remonta a 1959 cuando el físico y premio Nobel R. Feynman pronunció en el Instituto de Tecnología de California su ahora famoso discurso [1]. Feynman trató en su conferencia del problema de la manipulación individual de objetos tan pequeños como átomos y moléculas y de las múltiples oportunidades tecnológicas que ofrecería dicha manipulación. En aquel momento su discurso no tuvo una gran repercusión, pero hoy día muchas de sus predicciones se han cumplido con bastante exactitud. Sin embargo, la palabra Nanotecnología no aparece mencionada en dicho discurso. En realidad el término “Nanotecnología” fue acuñado en 1974 por el profesor N. Taniguchi de la Universidad de Ciencia de Tokio en un artículo titulado “*On the Basic Concept of Nanotechnology*”, que se presentó en una conferencia de la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Precisión [2]. En este contexto, la Nanotecnología se presenta como la tecnología que nos permitirá separar, consolidar y deformar materiales átomo a átomo o molécula a molécula.

En el año 1986 las ideas de Feynman y Taniguchi se concretaron algo más, cuando E. Drexler publicó el libro titulado “*Engines of Creation*” [3] en el que describe cómo será viable construir desde ordenadores hasta maquinaria pesada, ensamblando molécula a molécula, ladrillo a ladrillo, mediante *nanorobots* ensambladores, que funcionarán de un modo parecido a como lo hacen los ribosomas y otros agregados moleculares en las células de nuestro cuerpo. Este conjunto de ideas, elaboradas y desarrolladas en el periodo 1960-1990, han sido el punto de arranque de lo que hoy en día conocemos por Nanotecnología, el bagaje creciente de conocimientos teórico-prácticos que nos permitirán dominar la materia en la región de dimensiones comprendida entre 1 y 100 nm, y que denominamos nanoescala.

El trabajo con objetos tan pequeños entraña una gran dificultad, y de hecho fue algo prácticamente imposible hasta que se desarrollaron los microscopios de campo cercano (SPMs)

a partir del microscopio de efecto túnel (STM) [4]. El STM fue inventado por H. Rohrer y G. Binnig a principios de la década de 1980, contribución por la que recibieron el Premio Nobel en 1986. Las herramientas SPM permiten no sólo la visualización, sino también la manipulación de objetos de dimensiones nanométricas y de muy distinta naturaleza. En la actualidad, estas técnicas son de utilización rutinaria en los laboratorios de Nanociencia y Nanotecnología de todo el mundo, donde se diseñan, no tanto dispositivos concretos, sino experimentos que demuestren las posibilidades de estas “nuevas” tecnologías.

Todos los conocimientos generados han desembocado en la puesta a punto de diferentes iniciativas (programas de investigación, nuevos centros y equipamientos, etc.) para lograr que dichos conocimientos tuviesen una traducción en la tecnología, generando aplicaciones reales, tangibles. La gran belleza de estos experimentos, junto con las enormes expectativas para aplicaciones que de ellos se derivan, ha conducido a la gran proliferación del prefijo “nano” (muchas veces un tanto abusiva con el simple objetivo de intentar revalorizar una línea de investigación). Así, oímos hablar de disciplinas como nanoquímica, nanoelectrónica, nanofotónica, nanomedicina o nanobiotecnología; o de objetos tales como nanopartículas, nanotubos, nanoimanes o nanomotores. En definitiva, el colocar el prefijo “nano” delante de una palabra determinada nos indica que ese campo se va estudiar enfatizando aquellos aspectos del mismo relacionados con la nanoescala.

Buscando un símil sencillo, el fundamento en el que se basa gran parte de la tecnología actual se asemeja al trabajo realizado por un escultor, que cincela, pule y modela un bloque de material para obtener un objeto más pequeño con la forma deseada. Puesto que cada vez son necesarias tecnologías de fabricación más precisas, es importante disponer de tamaños de cincel progresivamente más pequeños. Este planteamiento es conocido como tecnología de fabricación descendente o “*top-down*” (de arriba hacia abajo). Un ejemplo del éxito de esta aproximación lo encontramos en la industria

de la electrónica que desde hace más de 40 años ha mantenido un incremento continuado de la densidad de transistores que se pueden integrar sobre una oblea de silicio, de forma que el número de elementos dentro en un dispositivo de estado sólido se dobla cada 18 meses. Esta tendencia, propuesta en los años sesenta por G. Moore, co-fundador de Intel, es lo que hoy se denomina “ley de Moore” [5].

Sin embargo sabemos que los métodos de fabricación “*top-down*” poseen una serie de limitaciones intrínsecas. El primero de estos problemas tiene que ver con el hecho de que a medida que se reduce el tamaño de un objeto, la relación superficie/volumen crece y, puesto que las propiedades físicas de una superficie son generalmente muy distintas a las del volumen, las propiedades funcionales del material cambiarán al reducir su tamaño a la escala nanométrica. Estas modificaciones en las propiedades se conocen como efectos de tamaño finito. El segundo problema con que nos encontramos en esta carrera hacia la minituarización reside en que en la nanoescala se hacen más palpables los llamados efectos cuánticos. Por último, otro problema fundamental que aparece al intentar seguir disminuyendo el tamaño de un objeto es que cada vez resulta más difícil mejorar las herramientas que permiten su manipulación.

Enfrentarse a los desafíos planteados por la miniaturización extrema, que permita explotar las propiedades emergentes en la nanoescala, impone la necesidad de desarrollar una “nueva tecnología”: ese es el papel de la Nanotecnología. La aproximación “nano” es, por tanto, muy diferente de la “*top-down*”, pues el planteamiento está basado exactamente en lo contrario: ir de lo pequeño a lo grande, construyendo dispositivos a partir de sus componentes últimos. En este caso, se trata de trabajar no como un escultor, sino como un albañil, que construye una pared partiendo de una serie de elementos básicos, los ladrillos. Esta aproximación, de tipo ascendente, que también se conoce como “*bottom-up*” (de abajo hacia arriba), utiliza para dar forma a diferentes materiales o dispositivos, componentes básicos muy variados tales como átomos, ácidos nucleicos, proteínas, nanopartículas o nanotubos.

Sólo se conoce un sistema que funcione verdaderamente siguiendo los principios fundamentales de la Nanotecnología que hemos expuesto anteriormente: la vida. Desde hace casi 4000 millones de años sobre la Tierra, los seres vivos realizan sus funciones vitales mediante procesos de reconocimiento molecular, auto-organización, auto-ensamblando, motores moleculares... Así pues, otra idea fundamental en Nanotecnología es la de aprovechar estos conceptos y procesos para llegar a construir nuevos dispositivos tecnológicos.

Hoy día estamos todavía lejos de la verdadera explosión de la Nanotecnología. La mayor parte del conocimiento se reduce a millares de experimentos de laboratorio, conocimiento que podríamos llamar Nanociencia. Las aplicaciones de la Nanotecnología están llegando poco a poco, aunque en el momento actual sólo un puñado de productos simples explotan las nuevas propiedades de su nanoestructura. En este artículo ilustraremos, desde un punto de vista básico, la capacidad de la Nanociencia para generar futuras aplicaciones.

2. Nuevos materiales, nuevos procesos, nuevos dispositivos

En los últimos años se han desarrollado materiales que, debido a su estructura nanométrica, presentan nuevas propiedades, y por tanto tienen aplicaciones en campos tan diversos como son la transmisión de información mediante luz, el almacenamiento de datos, la generación y el transporte eficientes de energía eléctrica, la síntesis de catalizadores, la elaboración de textiles más resistentes, o la fabricación de nuevos implantes óseos. El gran número de nuevos materiales y dispositivos demostradores que se han desarrollado en estos años ha sido fruto, por un lado, del desarrollo de sofisticadas técnicas de síntesis, caracterización y manipulación que se han puesto a punto y, por otro, del gran avance en los métodos de computación en la nanoescala (técnicas *ab-initio*, dinámica molecular, etc.) [6] que se han probado en las grandes instalaciones dedicadas al cálculo científico de altas prestaciones. Es precisamente la combinación de experimentos punteros con métodos teóricos precisos un elemento esencial para comprender un gran número de procesos y mecanismos que operan en la nanoescala. En concreto, una de las aportaciones teóricas más importantes al desarrollo de la Nanotecnología ha llegado de la mano de la Teoría de Funcionales de la Densidad (DFT, en sus siglas en inglés) [7] por la que en 1998 Walter Kohn recibió el Premio Nobel en Química, compartido con John A. Pople, “padre” de la Química Cuántica. Con respecto al desarrollo experimental, cabe resaltar el alto grado de desarrollo de las técnicas SPM para ver y manipular la materia a escala nanométrica en multitud de ambientes diferentes (ultra alto vacío, humedad controlada, celdas catalíticas, temperaturas variables,...). Esta capacidad nos ha permitido diseñar nuevos experimentos con los que comprender el comportamiento de nuevos materiales y dispositivos. Dada la gran variedad de materiales y sus aplicaciones [8, 9], es imposible en un artículo presentar una visión completa de la situación de la Nanotecnología, por lo que nos vamos a limitar a presentar algunos ejemplos que ilustran el estado actual de este campo.

Hacia la electrónica molecular.

Debido a su tamaño nanométrico, las estructuras moleculares pueden poner de manifiesto nuevas propiedades electrónicas. Sin embargo, la necesidad de poder producir estructuras nanométricas de forma masiva, tal y como requieren las aplicaciones industriales hace que la manipulación individual de nano-objetos como las moléculas pase a un segundo plano, requiriéndose alternativas más útiles para incorporar la Nanotecnología a los procesos de fabricación. Por esta razón, en los últimos años se están estudiando profusamente las condiciones de formación y las propiedades de capas autoensambladas de diferentes moléculas orgánicas sobre superficies [10, 11]. En estos casos la superficie no sólo proporciona un soporte, sino que posee un papel activo en la formación de diferentes patrones moleculares en dos dimensiones. Así, la posibilidad de generar sistemas autoensamblados de moléculas con propiedades bien definidas y dirigidas hacia la realización de funciones concretas abre un camino para cambiar desde el imperante paradigma del

silicio en la electrónica hacia otro basado en la electrónica molecular. Este nuevo paradigma será mucho más rico por la gran diversidad de componentes moleculares que pueden entrar en juego. Entre los componentes prometedores para la Nanotecnología, que están relacionados con las moléculas orgánicas, y que habrá que tener en cuenta en el futuro de la microelectrónica, estarán los fullerenos, los nanotubos de carbono y el grafeno, de los que hablamos a continuación.

Los fullerenos o “bucky-balls”.

Con este nombre se denomina al conjunto de distintas moléculas cerradas sobre sí mismas con formulación C_n . El más conocido, por lo estable y abundante en la naturaleza es el llamado C_{60} , que está formado por 12 pentágonos y 20 hexágonos, dispuestos como en un balón de fútbol (ver Figura 1, parte superior). Las aplicaciones nanotecnológicas que se pueden derivar del uso de esta molécula están todavía en fase de estudio y son muy variadas. Sin embargo, aunque actualmente no existen aplicaciones concretas ya se han sintetizado más de 1000 nuevas moléculas basadas en fullerenos y hay más de 100 patentes internacionales registradas. El carácter rectificador de los fullerenos les hace atractivo para su uso en electrónica molecular.

La formación de este tipo de estructuras se produce más fácilmente de lo que podemos imaginar, pues son uno de los principales integrantes de la carbonilla y se generan abundantemente en cualquier combustión. Sin embargo, a día de hoy uno de los principales problemas para su utilización es el de conseguir una síntesis *controlada* de fullerenos. Esto requiere complicadas técnicas, tales como la vaporización del grafito o la pirólisis láser, que normalmente producen exclusivamente los fullerenos más estables. Recientemente

se ha propuesto un nuevo método para conseguirlo basado en principios “nano”. Se trata de partir de una molécula precursora sintetizada de forma tal que sea como un fullereno abierto, con los enlaces rotos saturados por hidrógenos [12]. Esta molécula se puede plegar sobre sí misma mediante una transformación topológica de manera que de lugar a un fullereno. Se trata de partir de una estructura plana (un recortable) para posteriormente ensamblar un objeto en tres dimensiones. Este plegado se consigue mediante un proceso de des-hidrogenación catalizada por una superficie. Una vez que la molécula plana ha perdido estos hidrógenos se cierra sobre sí misma de forma espontánea formando un fullereno. Este proceso se ha podido seguir, entre otras técnicas, mediante imágenes de microscopía túnel *in-situ*, como las que se muestran en la Figura 2, en la que se ve la forma de la molécula antes y después de ser sometida a calentamiento [13]. Los mecanismos existentes en el proceso se pueden entender gracias a los cálculos *ab-initio* que apoyan la investigación experimental. Esta combinación pone de manifiesto como una molécula plana de carbono sin hidrógenos se pliega espontáneamente. La belleza de este nuevo método de síntesis reside en que si se sintetizan moléculas precursoras planas con diferentes topologías se pueden conseguir moléculas cerradas de diferentes formas, tamaños e incluso que contengan átomos diferentes al carbono. Así se ha sintetizado por primera vez la molécula $C_{57}N_3$ sobre una superficie.

Nanotubos de carbono.

Si el descubrimiento del C_{60} fue un hito importante para la Nanotecnología, el de los llamados nanotubos de carbono lo ha superado con creces [14]. Los nanotubos de carbono, unas 10.000 veces más finos que un cabello, pre-

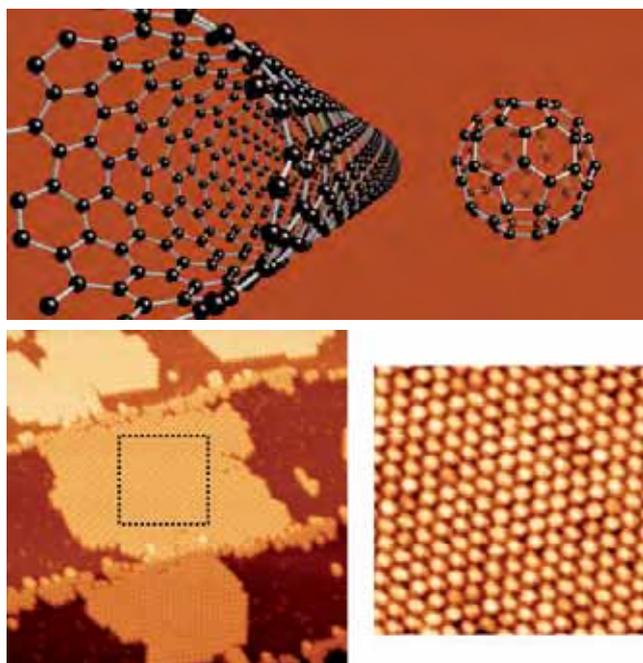


Figura 1. Parte superior: Ilustración esquemática de un nanotubo de carbono quiral y de un fullereno C_{60} . Parte inferior: imágenes STM de fullerenos depositados sobre una superficie de Platino. Se aprecia como los fullerenos se agrupan formando islas con una estructura hexagonal. Cortesía de G. Otero, J. Méndez, J. A. Martín-Gago (grupo ESISNA del ICMM).

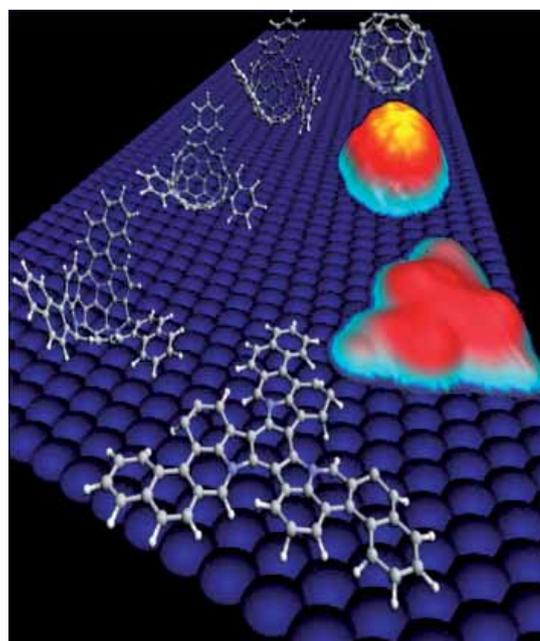


Figura 2. Ilustración que muestra la secuencia de la transformación progresiva de una molécula policíclica aromática hidrogenada (PAH) a medida que pierde hidrógenos y se transforma en un fullereno. En colores, a la derecha, las imágenes STM obtenidas antes y después de cerrarse la molécula. Cortesía de G. Otero, J. Méndez, J. A. Martín-Gago (grupo ESISNA del ICMM) y G. Biddau y R. Pérez (Universidad Autónoma de Madrid).

sentan excelentes propiedades físicas [15] y su fabricación resulta relativamente económica. Un cable fabricado de nanotubos de carbonos resultaría 10 veces más ligero que uno de acero con el mismo diámetro pero sería ¡100 veces más resistente! A estas impresionantes propiedades mecánicas se le añaden unas interesantes propiedades eléctricas, puesto que pueden ser tanto conductores como aislantes, según la topología que presenten.

Un nanotubo de carbono se obtiene mediante el plegado sobre si mismo de un plano atómico de grafito (enrollándolo), como se aprecia en la parte superior de la Figura 1. Según como se pliegue el plano grafitico se obtiene un nanotubo que puede conducir la corriente eléctrica, ser semiconductor o ser aislante. En el primer caso, los nanotubos de carbono son muy buenos conductores a temperatura ambiente, pudiendo transportar elevadas densidades de corriente. En el segundo presentan propiedades rectificadoras. Por otra parte, si inducimos defectos en la estructura podemos generar moléculas semiconductoras y así formar diodos o transistores. Es decir, tenemos todos los elementos en nuestras manos para construir nanocircuitos basados en carbono [16].

Grafeno.

A un solo plano atómico de grafito se le llama grafeno, y éste, a diferencia del grafito, es difícil de obtener. Recientemente, mediante cálculos teóricos, se han realizado predicciones acerca de las importantes propiedades electrónicas que podría tener este material. Entre ellas una altísima movilidad electrónica y una baja resistividad, de manera que estos planos atómicos podrían ser los futuros sustitutos del silicio en los dispositivos electrónicos. Ahora bien, a día de hoy, estas propuestas provienen esencialmente de cálculos teóricos [17] y, por tanto, antes de que el grafeno pase a sustituir al silicio en la electrónica del futuro, es necesario verificar las predicciones teóricas en el laboratorio. Actualmente, éste es un campo muy activo de investigación, y muchos grupos están trabajando en la obtención de capas de grafeno soportadas sobre diferentes materiales, como polímeros o aislantes, para poder determinar sus propiedades eléctricas y comprobar las predicciones teóricas.

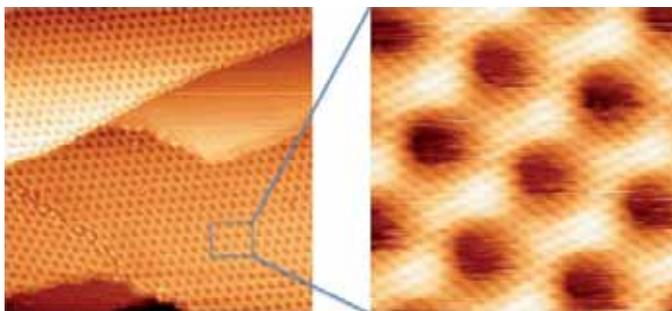


Figura 3. Imágenes STM de grafeno soportado sobre un monocristal de Pt(111). La imagen de la derecha es una imagen detallada sobre la imagen de la izquierda. En ellas se observa una periodicidad hexagonal correspondiente al patrón de Moiré formado al hacer coincidir la estructura atómica del grafeno con la del platino. La estructura periódica con un parámetro de red más pequeño que se muestra en la imagen de la derecha corresponde a los átomos de carbono que forman la capa de grafeno. Cortesía de G. Otero, J. Méndez, J. A. Martín-Gago (grupo ESISNA del ICMM).

La Figura 3 muestra un plano atómico de grafeno sobre una superficie de Platino. El estudio de grafeno sobre metales de transición es un campo muy activo de investigación ya que las capas de grafeno crecen de manera fácil, muy controlada y con un bajo número de defectos sobre estas superficies. Además el grafeno sobre un sustrato forma patrones conocidos como redes de Moiré, en las que la periodicidad atómica de las dos redes cristalinas (grafeno y sustrato) coincide cada 2-3nm, dando lugar a deformaciones de la capa de grafeno [18], que se reflejan como prominencias en la imagen STM de la Figura 3.

Nanohilos.

No sólo las moléculas, los nanotubos o el grafeno son las apuestas para sustituir al silicio. Otros elementos como los nanohilos fabricados a partir de materiales semiconductores o los nanohilos metálicos tendrán también cierto protagonismo. En concreto, los nanohilos semiconductores presentan un gran potencial como transistores pero también presentan aplicaciones en campos como optoelectrónica [19] o en la fabricación de sensores biológicos [20]. Por otro lado los nanohilos metálicos [21], cuya síntesis controlada es más difícil, poseen gran interés como interconectores. En el caso de los nanohilos formados de materiales como Ni, Co o Fe se puede aprovechar también su potencial comportamiento magnetorresistivo para ser usados en dispositivos de almacenamiento magnético. Los nanohilos metálicos son interesantes a su vez porque los efectos de tamaño inducen en ellos la aparición de transiciones de fase martensíticas y la aparición de configuraciones no cristalinas [22] (ver Figura 4).



Figura 4. Imagen obtenida mediante una simulación de dinámica molecular en la que se observa la formación de un hilo de níquel de tipo icosaédrico (formado por una sucesión de pentágonos separados por un átomo situado sobre el eje del hilo). Este tipo de hilos se forma en el proceso de ruptura de un hilo metálico de forma prismática, con simetría FCC, que se ha deformado, mediante estiramiento, a lo largo de la dirección cristalina (100). Cortesía de P. García-Mochales (Universidad Autónoma de Madrid).

Nanopartículas.

Quizás, junto a los nanotubos de carbono, las nanopartículas representan los materiales que tienen una repercusión tecnológica más inmediata. Además de sus propiedades intrínsecas, las nanopartículas, debido a su pequeño tamaño, pueden convertirse en diminutos dispositivos capaces de realizar otras funciones, como transportar un medicamento específico por el torrente sanguíneo sin obstruirlo. Para lograr esto, las nanopartículas deben ser el soporte de capas de moléculas autoensambladas que confieren una funcionalidad adicional a las mismas.

Como su propio nombre indica, el término “nanopartícula” designa una agrupación de átomos o moléculas que dan

lugar a una partícula con dimensiones nanométricas. Es decir, que su tamaño está comprendido entre 1 y 100 nm. Dependiendo de cuáles sean los átomos o moléculas que se agrupan se originarán diferentes tipos de nanopartículas. Así, por ejemplo, tendremos nanopartículas de oro, de plata o nanopartículas magnéticas si están formadas por átomos de Fe o Co. Su pequeño tamaño hace que la relación superficie/volumen crezca y por tanto que estas estructuras tengan unas propiedades características y esencialmente distintas a las que presenta el material en volumen.

Una estrategia para la formación de nanopartículas es recubrirlas con distintas capas de manera tal que cada una aporte funcionalidades diferentes al sistema. Así, por ejemplo, recientemente se han descrito nanopartículas cuyo interior está formado por un material magnético, como el Co, seguido de una capa intermedia de SiO₂ que aporta estabilidad al sistema y finalmente una superficie de oro [23]. El tamaño final de la nanopartícula es de 3 nm, y esta estructura laminar hace que tengan un núcleo magnético que posibilite su guiado, y una superficie de oro que facilite el autoensamblado de moléculas orgánicas o biológicas para diferentes aplicaciones. Entre éstas destaca su uso como biosensores. Para ello se inmoviliza material biológico, como ácido desoxirribonucleico (ADN) o el llamado ácido nucleico péptido (PNA, del inglés peptide *nucleic acid*), que siendo un ácido nucleico artificial, presenta un “esqueleto” molecular formado por enlaces peptídicos y una estructura de bases nucleicas exactamente igual a la del ADN. El PNA puede reconocer cadenas complementarias de ADN, incluso con mayor eficiencia para la hibridación que la que presenta el ADN para reconocer su hebra complementaria. Por este motivo, el PNA se ha propuesto como sonda para la fabricación de biosensores altamente eficientes. Estas macromoléculas unidas a superficies o nanopartículas son capaces de detectar diferentes analitos de interés, particularmente otras moléculas biológicas [24, 25].



Figura 5. Imagen del virus diminuto del ratón (MVM) obtenida mediante microscopía AFM en medio fisiológico. El virus MVM tiene forma icosaédrica y un diámetro de 25 nm. Se observa la simetría pentagonal correspondiente a un vértice del icosaedro. Sobre dicho vértice se pueden observar las espículas que forman una estrella. Cortesía de C. Carrasco (ICMM-CSIC), P.J. de Pablo (Universidad Autónoma de Madrid) y M. García-Mateu (Centro de Biología Molecular “Severo Ochoa” de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC).

Sin embargo, el concepto de nanopartícula debe concebirse en un sentido más amplio ya que no sólo puede estar basada en un núcleo inorgánico, pudiéndose sintetizar nanopartículas poliméricas. Yendo un poco más allá, una cápsida vírica puede entenderse como una nanopartícula hueca formada por una carcasa proteica. Esta cápsida vírica (ver un ejemplo en la Figura 5) tiene dimensiones nanométricas y, en muchos casos, burla con facilidad las membranas celulares. Por esta razón este tipo de “nanopartículas” se proponen para su uso en nanomedicina, y son el objeto de estudios básicos en los que las herramientas como los microscopios de fuerzas atómicas juegan un papel esencial. En particular, estas herramientas nos permiten caracterizar las propiedades mecánicas y las condiciones de ruptura de cápsidas víricas [26] así como la forma en la que dichas cápsidas se comportan ante, por ejemplo, cambios controlados de humedad [27].

3. Conclusiones

En un discurso recientemente impartido en la Universidad Europea de Madrid, William F. Clinton, ex-Presidente de los EE.UU, afirmó que “el cometido del siglo XXI será salvar al mundo del cambio climático, regenerar la economía y crear empleo. El futuro más allá será la Nanotecnología y la biotecnología”. El propio W.F. Clinton fue el impulsor de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología [28] durante su mandato, convirtiendo durante los últimos 10 años a EE.UU. en el líder mundial en la generación de conocimientos básicos y aplicados en el ámbito de la Nanotecnología.

Nadie pone en duda las afirmaciones de W.F. Clinton sobre el papel de la Nanotecnología en nuestro futuro a medio y largo plazo, por lo que es imperativo estar suficientemente preparados para construir este nuevo paradigma científico. En el caso concreto de España, las dos últimas ediciones del Plan Nacional de I+D+I han encumbrado las investigaciones en Nanociencia y Nanotecnología a la categoría de Acción Estratégica [29,30]. En la actualidad se están poniendo en marcha varios centros dedicados a Nanotecnología. Dichas iniciativas son producto, por lo general, de costosos impulsos puntuales, locales, dirigidos por científicos con iniciativa, pero no son fruto de una actuación de conjunto, planificada siguiendo una estrategia guiada por unos objetivos ambiciosos, en los que impere la coordinación y el uso eficiente de los recursos. La actual coyuntura económica no invita al optimismo a este respecto, por lo que sería necesario poner en marcha iniciativas que promuevan la adquisición de infraestructuras, la formación de técnicos, la coordinación entre centros emergentes, etc.

Otro punto sobre el que no hay que descuidarse tiene que ver con la formación, en todos los niveles educativos, en Nanotecnología. En este sentido son numerosas las universidades españolas que ofrecen cursos de master y/o doctorado con contenidos relacionados con la Nanotecnología. Sin embargo, muchos de estos cursos tienen pocos estudiantes inscritos, al igual que ocurre con muchos estudios de grado relacionados con las ciencias básicas. La tarea de fascinar y atraer a nuestros jóvenes hacia la ciencia debe comenzar mucho antes. En este sentido, los conceptos inherentes a la Nanotecnología deben formar parte del conocimiento que debe llegar a los estudiantes de educación secundaria,

como ocurre en países como Alemania, Finlandia, Taiwán, Japón, EE.UU., etc. Además, la Nanotecnología es una materia que causa cierta fascinación a los adolescentes por lo que puede ser un buen punto de partida para incentivar las vocaciones científicas. Esta ha sido una de las principales razones por la que los autores de este artículo junto con otros investigadores (Carlos Briones del Centro de Astrobiología y Elena Casero de la Universidad Autónoma de Madrid) accedieron a la petición de la Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECyT) (ver Figura 6) para escribir una Unidad Didáctica de Ciencia y Tecnología. Dicho libro ya se encuentra en todos los institutos españoles de educación secundaria y bachillerato, y se puede descargar desde la web de la FECyT [31]. Esperemos que esta pequeña contribución, junto con otras de mayor calado que deben promoverse desde las diversas administraciones públicas, permita tomar la senda que nos lleve a medio plazo hacia la tan ansiada sociedad basada en el conocimiento.

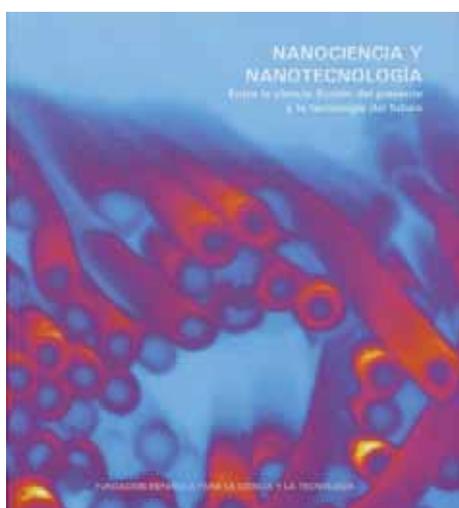


Figura 6. Portada de la Unidad Didáctica “Nanociencia y Nanotecnología: entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro”, editada por la Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECYT).

Agradecimientos

J. A. Martín-Gago agradece el apoyo del MICINN a través del proyecto MAT2008-01497/NAN y Programa Consolider CSD2007-0041. P. A. Serena agradece el apoyo del MICINN a través del proyecto FIS2006-11170-C02-01 y de la Comunidad Autónoma de Madrid mediante el Programa S-0505/MAT/0202 (NanoObjetos-CM).

Referencias Bibliográficas

- [1] R. FEYNMAN. *There's a plenty of a room at the bottom*, Engineering and Science **23**, 22 (1960). Una transcripción del discurso de R. FEYNMAN puede encontrarse en <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [2] N. TANIGUCHI. *On the Basic Concept of “Nano-Technology”*, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering (1974).
- [3] K.E. DREXLER. *Engines of creation. The coming era of nanotechnology*, Anchor Books (New York) (1986).
- [4] G. BINNIG AND H. ROHRER. *Scanning tunneling microscopy from birth to adolescence*, Reviews of Modern Physics, **59**, 615 (1987).
- [5] G. MOORE. *Cramping more components onto integrated circuits*, Electronics **38**, 114 (1965).
- [6] J. KOHANOFF. *Electronic Structure Calculations for Solids and Molecules: Theory and Computational Methods*, Cambridge University Press (2006).
- [7] C. FIOLETTI, F. NOGUEIRA, Y M. MARQUES EDS. *A Primer in Density Functional Theory*, Springer-Verlag (2003).
- [8] C.P. POOLE, JR. Y F. J. OWENS. *Introduction to Nanotechnology*, Wiley (2003).
- [9] E.L. WOLF. *Nanophysics and Nanotechnology. An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience*, Wiley (2006).
- [10] J. A. MARTÍN-GAGO Y J. MÉNDEZ. *Nanotecnología, macromoléculas y manipulación molecular*, Revista Española de Física, **19**, 19 (2005).
- [11] J. MÉNDEZ, R. CAILLARD, G. OTERO, N. NICOARA Y J.A MARTÍN-GAGO (2006). *Nanostructured Organic Material: From Molecular Chains to Organic Nanodots*, Adv. Mater. **18**, 2048.
- [12] B. GÓMEZ-LOR, O. DE FRUTOS Y A. M. ECHAVARREN. *Synthesis of ‘crushed fullerene’ C60H60*, Chem. Commun. 2431–2432 (1999).
- [13] G. OTERO, G. BIDDAU, C. SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, R. CAILLARD, M.F. LÓPEZ, C. ROGERO, F.J. PALOMARES, N. CABELLO, M.A. BASANTA, J. ORTEGA, J. MÉNDEZ, A.M. ECHAVARREN, R. PÉREZ, B. GÓMEZ-LOR, Y J.A. MARTÍN-GAGO. *Fullerenes from aromatic precursors by surface-catalysed cyclodehydrogenation*, Nature **454**, 65 (2008).
- [14] S. IIJIMA. *Helical micro-tubules of graphitic carbon*, Nature **354**, 56 (1991).
- [15] M.J.O'CONNELL. *Carbon Nanotubes: Properties and Applications*, CRC Press (2006).
- [16] PHILIP G. COLLINS, MICHAEL S. ARNOLD, Y PHAEDON AVOURIS. *Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown*, Science **292**, 706 (2001).
- [17] A.H. CASTRO NETO, F. GUINEA, N.M.R. PERES, K.S. NOVOSELOV Y A.K. GEIM. *The electronic properties of graphene*, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
- [18] A.L. VÁZQUEZ DE PARGA, F. CALLEJA, B. BORCA, M.C.G. PASSEGGI, JR., J.J. HINAREJOS, F. GUINEA, Y R. MIRANDA. *Periodically Rippled Graphene: Growth and Spatially Resolved Electronic Structure* Phys. Rev. Lett. **100**, 056807 (2008).
- [19] X. DUAN, Y. HUANG, R. AGARWAL Y C.M. LIEBER. *Single-Nanowire Electrically Driven Lasers*, Nature **421**, 241 (2003).
- [20] F. PATOLSKY, B. P. TIMKO, G. ZHENG Y C. M. LIEBER. *Nanowire-Based Nanoelectronic Devices in the Life Sciences* MRS Bull. **32**, 142 (2007).
- [21] N. AGRAÏT, A.L. YEYATI, Y J.M. VAN RUITENBEEK. *Quantum properties of atomic-sized conductors*, Physics Reports **377**, 81 (2003).
- [22] P. GARCÍA-MOCHALES, R. PAREDES, S. PELÁEZ Y P. A. SERENA. *Statistical analysis of the breaking processes of Ni nanowires*, Nanotechnology **19**, 225704 (2008).
- [23] M. PITA, J.M. ABAD, C. VAZ-DOMINGUEZ, C. BRIONES, E. MATEO-MARTÍ, J.A. MARTÍN-GAGO, M.P. MORALES, Y V.M. FERNÁNDEZ. *Synthesis of cobalt ferrite core/metallic shell nanoparticles for the development of a specific PNA/DNA biosensor*, Journal of Colloid and Interface Science **321**, 484 (2008).
- [24] C. BRIONES Y J.A. MARTÍN-GAGO. *Nucleic Acids and Their Analogs as Nanomaterials for Biosensor Development*, Current Nanoscience **2**, 257 (2006).

- [25] J. MERTENS, C. ROGERO, M. CALLEJA, D. RAMOS, J.A. MARTÍN-GAGO, C. BRIONES, Y J. TAMAYO. *Label-free detection of DNA hybridization based on hydration-induced tension in nucleic acid films*, *Nature nanotechnology* **3**, 301 (2008).
- [26] C. CARRASCO, A. CARREIRA, I. A. T. SCHAAP, P. A. SERENA, J. GÓMEZ-HERRERO, M.G. MATEU, Y P. J. DE PABLO. *DNA-mediated anisotropic mechanical reinforcement of a virus*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **103**, 13563 (2006).
- [27] C. CARRASCO, M. DOUAS, R. MIRANDA, M. CASTELLANOS, P.A. SERENA, J.L. CARRASCOSA, M.G. MATEU, M.I. MARQUÉS, Y P.J. DE PABLO (2009). *The capillarity of nanometric water menisci confined inside closed-geometry viral cages*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 5475.
- [28] J. W. KLEIKE, Ed. *National Nanotechnology Initiative: Assessment and Recommendations*, Nova Science Pub. Inc. (2009). Toda la información sobre las actividades de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de EE.UU. se puede encontrar en <http://www.nni.gov>
- [29] VARIOS AUTORES. *Nanociencia y Nanotecnología en España: Un análisis de la situación presente y de las perspectivas de futuro*, Fundación Phantoms (2008). Este libro puede descargarse de la página web <http://www.phantomsnet.net/Resources/NNE.php>.
- [30] P.A. SERENA. *The implementation of the Action Plan for Nanosciences and Nanotechnologies in Spain (2005-2007)*, E-Nano Newsletter (Editada por la Fundación Phantoms) 15, 14 (2009). La versión completa de este informe se encuentra también en la página web de la Oficina Europea del MICINN (<http://www.oemiccinn.es/area5/area12>).
- [31] J.A. MARTÍN-GAGO, E. CASERO, C. BRIONES, Y P. A. SERENA. *Unidad Didáctica Nanociencia y Nanotecnología. Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro*, editado por la Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECyT) (2008). Este libro está disponible gratuitamente en <http://www.fecyt.es>.

José Ángel Martín Gago

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Centro de Astrobiología (CSIC/INTA)
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

Pedro A. Serena Domingo

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

Nuestros servicios:

Desarrollo web

- Diseño y programación
- Creación de intranets de gestión interna
- Aplicaciones Flash
- Alojamiento y gestión de dominios

Accesibilidad triple "A"

- Adaptación de documentos pdf
- Adaptación de páginas web

E-marketing

- Análisis de posicionamiento en internet
- Posicionamiento en buscadores



CREIN

Soluciones integrales para la comunicación



C/ Martín de los Heros, 66 • 28008 - Madrid
Tel +34 91 5428282 • Fax +34 91 5593060
www.crein.com