

Sumario

1. Presentación

El lento despertar de la Nanotecnología en España (Antonio Correia, *Fundación Phantoms, Pabellón C, Campus de Cantoblanco*; Juan José Sáenz, Departamento de Física de la Materia Condensada, C-III, Universidad Autónoma de Madrid; Pedro A. Serena, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas) 3

2. Tribuna de Debate:

Nanociencia: manipulación a escala atómica y molecular (B. Biel, F. Flores, *Dpto. Física Teórica de la Materia Condensada, C-III, Universidad Autónoma de Madrid*; I. Brihuega, P. J. de Pablo, J. Gómez-Herrero, Cristina Gómez-Navarro, J. María Gómez-Rodríguez, *Laboratorio de Nuevas Microscopías, Dpto. Física de la Materia Condensada, C-III, Universidad Autónoma de Madrid*; Ó. Custance, *Graduate School of Engineering, Osaka University*) 11

Efectos de tamaño cuántico y su importancia para la reactividad y estabilidad de nanoestructuras (Rodolfo Miranda, *Laboratorio de Superficies, Depto. de Física de la Materia Condensada e Instituto Nicolás Cabrera, Universidad Autónoma de Madrid*) 19

NanoFotónica: hacia el control sub-micrométrico de la luz (A. Blanco, *Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)*; C. López, *Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)*; A. García-Martín, *Instituto de Microelectrónica de Madrid (CSIC)*; G. Armellas, *Instituto de Microelectrónica de Madrid (CSIC)*; F. J. García Vidal, *Depto. de Física Teórica de la Materia Condensada, Universidad Autónoma de Madrid*) 27

Nanomagnetismo (M. A. García, *Instituto de Magnetismo Aplicado RENFE-UCM-CSIC, Depto. Física de Materiales*; P. Marín, *Instituto de Magnetismo Aplicado RENFE-UCM-CSIC, Depto. Física de Materiales*; J. M. González, *Instituto de Magnetismo Aplicado RENFE-UCM-CSIC, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC*; P. Crespo, *Instituto de Magnetismo Aplicado RENFE-UCM-CSIC, Depto. Física de Materiales*; A. Hernando, *Instituto de Magnetismo Aplicado RENFE-UCM-CSIC, Depto. Física de Materiales, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC*) 37

Nanobioteología: avances diagnósticos y terapéuticos (L. M. Lechuga, *Grupo de Biosensores. Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM-CNM). CSIC*) 43

Nanotecnología y Economía (E. Fontela, *Universidad Antonio de Nebrija*) 53

Nanotecnología en España (J. Sánchez Páramo, J. Alonso Andaluz, *Fundación para el Conocimiento Madri+d*) 61

3. Algunas tesis sobre Nanotecnología y Nanociencia 73

4. Visiones sobre Nanotecnología y Nanociencia

Patrick Van-Hove, *IST-FET, Comisión Europea* 76

José Luis Viviente Solé y Renzo Tomellini, *Unidad de Nanociencias y Nanotecnologías. Dirección General de Investigación. Comisión Europea* 77

Manuel Vázquez Villalabeitia, *Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC, Gestor de la Acción Estratégica en Nanociencia y Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia* 78

Antonio Correia, *Fundación Phantoms y Fernando Briones, Instituto de Microelectrónica de Madrid- CSIC* 79

José Manuel Báez Cristóbal, *Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología* 80

Jordi Pascual Gainza, *Director ejecutivo del Institut Català de Nanotecnologia* 81

Ricardo Ibarra García, *Director del Instituto de Nanotecnología de Aragón (INA)* 82

Héctor Guerrero Padrón, *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA, Círculo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología)* 83

Rodolfo Miranda Soriano, *Catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid* 85

Clara Eugenia Núñez, *Directora General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid* 86

5. Reseñas bibliográficas

FECYT (2005) *Spain NanoTechnology Think Tank (SNT3, 2004)*, Madrid, Especial Nanotecnología, nº 1, febrero 89

International Journal of Nanotechnology. Special Issue 'On Nanotechnology in Spain', 2(1/2), 2005 91

Nano. Nanotecnología en España. IV PRICIT, Comunidad de Madrid 93

Fontela, E. y otros (2006) *Convergencia NBIC: el desafío de la convergencia de las nuevas tecnologías (Nano-Bio-Info-Cogno)*. Colección EOI, Programa Desafíos, EOI, Fundación Vodafone, Madrid 95

6. Con otro aire

El Hombre de Flores (Patricio Morcillo. *Universidad Autónoma de Madrid*) 98

Esta versión digital de la obra impresa forma parte de la Biblioteca Virtual de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y las condiciones de su distribución y difusión de encuentran amparadas por el marco legal de la misma.

www.madrid.org/edupubli

edupubli@madrid.org



Biblioteca Virtual
CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Comunidad de Madrid

Consejo de Dirección de la Revista *madri+d*

Clara Eugenia Núñez

Directora General de Universidades e Investigación, Comunidad de Madrid

Alfonso González Hermoso de Mendoza

Subdirector General de Investigación. Dirección General de Universidades e Investigación, Comunidad de Madrid.

M^a Jesús Matilla Quiza

Vicerrectora de Investigación, Universidad Autónoma de Madrid (UAM).

José Francisco Álvarez Álvarez

Vicerrector de Investigación, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).

Francisco Marcellán Español

Director de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y la Acreditación (ANECA).

Manuel Dabrio Bañuls

Delegado Institucional del CSIC en la Comunidad de Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Eloy García Calvo

Vicerrector de Investigación, Universidad de Alcalá de Henares.

Juan Manuel Meneses Chaus

Adjunto al Vicerrector de Investigación y Relaciones Institucionales, Universidad Politécnica de Madrid.

Rafael Van Grieken Salvador

Vicerrector de Investigación, Universidad Rey Juan Carlos.

Carlos Andradas Heranz

Vicerrector de Investigación, Universidad Complutense de Madrid.

Patricio Morcillo Ortega

*Director de la Revista *madri+d*. Universidad Autónoma de Madrid.*

Pilar Puente Ruiz

*Secretaria del Consejo de Dirección de la Revista *madri+d*, Dirección General de Universidades e Investigación.*

Dirección y Administración de la REVISTA:

Director Revista, D. Patricio Morcillo – patricio.morcillo@uam.es

Subdirector Revista, D. Jesús Rodríguez Pomedá – jesus.pomeda@uam.es

Universidad Autónoma de Madrid

Facultad de CC.EE. y EE.

Ctra. de Colmenar Viejo, km 15. 28049 Cantoblanco (Madrid)

Tel.: 91 497 39 83. Fax: 91 497 42 18

Coordinadora de Redacción:

Amelia M. Alcahud

Coordinadora-Área de Comunicación:

Pilar Puente Ruiz

Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid

Edición y Administración de la REVISTA:

D. Antonio Verde, Director de la Oficina de Transferencia de Resultados de

Investigación (OTRI) de la UAM. Fundación General de la UAM

Ciudad Universitaria de Cantoblanco. Pabellón C, 2.^a planta

Ctra. de Colmenar Viejo, km 15. 28049 Madrid

Tel.: 91 397 39 83. Fax: 91 397 42 18

averde.fguam@uam.es

Asesores editoriales:

D. José Antonio Figueiredo Almaça (U.A. Lisboa)/Antonio Hidalgo Nuchera (U.P.M.)/José Miguel Rodríguez Antón (U.A.M.)

Proyecto gráfico:

base 12 diseño y comunicación

Imprime:

Elecé Industria Gráfica

ISSN: 1579-9417

Depósito Legal: M-41229-1998

Consejo Científico de la Revista *madri+d*

Eduardo Bueno Campos

Catedrático de Economía de la Empresa

Universidad Autónoma de Madrid

Mikel Buesa Blanco

Catedrático de Economía Aplicada

Universidad Complutense de Madrid

César Camisón Zornoza

Catedrático de Organización de Empresas

Universitat Jaume I

Pere Escorsa Castells

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Cataluña

(ETS de Terrassa)

Zulima Fernández Fernández

Catedrática de Organización de Empresas

Universidad Carlos III de Madrid

José Luis Galán González

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad de Sevilla

Luis Ángel Guerras Martín

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad Rey Juan Carlos I

Isabel Gutiérrez Calderón

Catedrática de Organización de Empresas

Universidad Carlos III de Madrid

José Emilio Navas López

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad Complutense de Madrid

Antonio Hidalgo Nuchera

Profesor Titular de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Madrid

José Molero Zayas

Catedrático de Economía Aplicada

Universidad Complutense de Madrid

Patricio Morcillo Ortega

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad Autónoma de Madrid

Mariano Nieto Antolín

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad de León

Ruth Rama Dellepiane

Profesora de Investigación

Instituto de Economía y Geografía, CSIC

Paloma Sánchez Muñoz

Catedrática de Economía Aplicada

Universidad Autónoma de Madrid

Camilo José Vázquez Ordás

Catedrático de Organización de Empresas

Universidad de Oviedo

Xavier Vence Deza

Catedrático de Economía Aplicada

Universidad de Santiago de Compostela

Los artículos y colaboraciones, publicados en esta revista, representan exclusivamente la opinión de sus autores, sin que en ningún momento comprometan a la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid, salvo cuando se mencione expresamente.

Presentación

El lento despertar de la Nanotecnología en España

A lo largo de la última década la Nanociencia y la Nanotecnología han pasado de ser unas ramas científico-tecnológicas emergentes, restringidas al ámbito de la investigación y cargadas de espectaculares promesas, a convertirse en unas de las principales líneas temáticas de la investigación que se desarrolla en los países más avanzados. Además, la Nanotecnología se ha convertido en un tema de impacto social, con grandes repercusiones mediáticas, a pesar de que muchos de los frutos prometidos se esperan a medio o largo plazo. Como ejemplo basta mencionar que el término “*nanotechnology*” aparece citado en el buscador “*Google*” más de cuarenta y cinco millones de veces, o la gran cantidad de referencias a este tema que aparecen en periódicos o revistas generalistas (ver, por ejemplo, el excelente servicio de noticias y recortes de prensa accesible en www.madrimasd.org). Esta transición se debe al impulso que desde los gobiernos de los EE.UU., Japón, Reino Unido, Alemania, Francia, etc, y de la Comisión Europea, se ha dado a las Nanotecnologías como elemento clave que permitirá mantener a medio y largo plazo la competitividad de las empresas e industrias del denominado primer mundo. Esa competitividad se basará en la generación de una verdadera oleada de nuevos conocimientos, que se transformarán en dispositivos, materiales, productos, e incidirán de forma significativa en nuestra calidad de vida. Esta oleada de conocimientos estará fundamentada en los avances en las Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones, la Biotecnología, la Nanotecnología, las Neurociencias, las Ciencias Medioambientales, etc.

No es momento de hacer una relación exhaustiva de los planes estratégicos de cada país y sus inversiones en formación, proyectos y construcción de centros dedicados a Nanotecnología. Toda esta información puede recopilarse en multitud de excelentes informes nacionales e internacionales, que claramente indican una inversión ingente en este campo. Un rápido vistazo a la Tabla 1 permite constatar el interés y apoyo crecientes que este tópico ha tenido en todo el mundo, esfuerzo al que se ha sumado de manera notable China en los últimos tres años (mostrando al mundo que su única baza competitiva no se basará exclusivamente en la mano de obra barata). Es muy interesante destacar que una parte considerable de las inversiones señaladas provienen del sector privado (sobre todo en Japón y EE.UU.), lo que constituye un indicador nítido de las expectativas puestas en la Nanotecnología como creadora de riqueza. Otro punto que ha incentivado la expansión de la Nanotecnología es su rápida convergencia con un sector que ya inició hace tiempo una carrera imparable: la Biotecnología. De hecho, la Nanobiotecnología es responsable de muchos de los más llamativos avances que han tenido lugar últimamente. Esto no hace más que profundizar en una cuestión: nos encontramos ante un nuevo paradigma multidisciplinar que requerirá de grandes inversiones económicas para construir nuevos centros y adquirir costoso equipamiento científico, pero también para formar personal suficientemente cualificado en la difícil tarea de la convivencia multidisciplinar dentro de los futuros grupos de investigación.

Desde hace tiempo, muchos investigadores españoles, adaptados plenamente a los modos de trabajo y a la competencia que se da en el mundo científico internacional, eran conedores de la importancia que este tema tenía tanto desde la perspectiva de la ciencia básica (¿cómo no soñar con entender, manipular y dominar la materia a escala nanométrica, usando los átomos y moléculas como elementos de un juego de construcción?) como de la ciencia aplicada (producción con optimización de recursos, vehículos de bajísimo consumo, materiales de resistencias increíbles, nanosensores de utilidad en diagnóstico de enfermedades, sistemas de filtrado de agua y aire, computadores diminutos de altas prestaciones, diminutas y potentes baterías, etc). Como ha sucedido en otras ocasiones, los planificadores de las políticas científicas no se percataron de la importancia de este tema, y fueron los propios científicos (aprovechando los vientos favorables e influencias de los

movimientos que se producían en Europa, Japón y EE.UU.) los que ejercieron su modesta, pero constante, influencia hasta lograr que la Nanociencia y la Nanotecnología se incorporasen tanto al vigente Plan Nacional de I+D+I como a los diversos Planes desarrollados por las Comunidades Autónomas. Como siempre ha ocurrido con los temas de investigación, lo que no se ha logrado plenamente es que una gran parte de las empresas (aunque siempre hay excepciones) comiencen a tomar en serio este tópico de investigación que puede suponer una auténtica revolución de los sistemas de producción, de la optimización de los recursos, del valor añadido en los productos, etc.

Tabla 1. Presupuesto dedicado a Nanotecnología en diversas regiones del mundo (M\$ / año)¹

Región	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Europa Occidental	126	151	179	200	225	400	650	950 ⁵	1050 ⁵
Japón	120	135	157	245	465	750	810 ⁴	875 ⁵	950 ⁵
EE.UU. ²	116	190	255	270	422	604	862	989 ⁵	1081 ⁵
Otros ³	70	83	96	110	380	520	511 ⁴	900 ⁵	1000 ⁵
TOTAL	432	559	687	825	1502	2274	2833	3714	4081

¹Fuente: M. Roco (National Science Foundation, EE.UU.) "Government Nanotechnology Funding: An international outlook".

²No incluye las iniciativas estatales.

³Otros: Australia, Corea, Canadá, Taiwán, China, Rusia, Singapur, Europa del Este.

⁴Fuente: UE.

⁵Fuente: National Science Foundation, EE.UU.

Entre las iniciativas que se promovieron en España a partir del año 2000 podemos destacar la creación de redes temáticas de amplio espectro, de carácter multidisciplinar (como lo es la Nanotecnología en sí misma), que han permitido la interrelación de comunidades científicas hasta entonces poco conectadas, incentivando la interacción entre grupos españoles para aumentar la masa crítica de expertos que puedan dedicarse a la resolución de problemas de índole compleja, donde se mezclan jergas y maneras de trabajar diferentes. Quizás las redes Nanociencia y NanoSpain constituyen los dos ejemplos más claros de autoorganizaciones de científicos. La red Nanociencia, ya desaparecida tras una andadura de cuatro años, fue pionera en el ámbito español y tuvo un carácter formativo, de ejercicio de puesta en común de metodologías, reuniendo a casi doscientos investigadores. Por otro lado, NanoSpain (www.nanospain.org) se configuró como una red de mayores proporciones (agrupa actualmente a casi 180 grupos de investigación de los sectores público y privado) con la clara intención de promover ante las autoridades, los gestores científicos, y la población en general, la existencia de un nuevo tipo de conocimiento, necesario para lograr generar ciencia competitiva y propiciar una nueva revolución tecnológica y económica. Otra iniciativa con el sello de "made in Spain" es la celebración en España de la serie de conferencias "Trends in Nanotechnology" que se han celebrado ininterrumpidamente desde hace seis años, constituyéndose en referente internacional. Estas reuniones, verdadero escaparate de la investigación española, han conseguido atraer a la flor y nata internacional de la investigación en Nanotecnología, propiciando una fuerte interacción con los grupos españoles. Estas iniciativas, si bien exitosas, necesitan seguir manteniéndose para fortalecer la posición de los grupos españoles con respecto a la de los grupos extranjeros y lograr su plena integración en el Espacio Europeo de Investigación.

A principios de 2003 las iniciativas relacionadas con la Nanotecnología empezaron a multiplicarse y el empuje de todas ellas se consolidó con la entrada en vigor del nuevo Plan Nacional de I+D+I en el que la Nanotecnología había encontrado, por fin, su hueco, incorporándose como objetivo de muchos de los Programas Nacionales y adquiriendo un protagonismo singular a través de la Acción Estratégica de Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC). Aparecieron nuevas redes de carácter regional, o de temática más restringida, los gobiernos de la Comunidades Autónomas incorporaron en sus programas regionales tópicos relacionados con Nanotecnología, se crearon foros de discusión orientados a propiciar el encuentro entre investigadores y empresarios y en los que la Nanotecnología era protagonista, se anunció la creación de varios Laboratorios e Institutos (de muy variado tamaño y distribuidos por toda España) dedicados a esta rama del saber. Se puede decir que en estos dos últimos años se ha producido una verdadera explosión de iniciativas en el ámbito de las Nanotecnologías. Un ejemplo de este impulso a escala nacional ha sido la reciente concesión de más de 12 millones de Euros entre casi una treintena de proyectos dentro de la primera convocatoria de ayudas de la antes citada Acción Estratégica del MEC. Otro ejemplo más cercano, del ámbito de la Comunidad Autónoma de Madrid, ha sido la puesta en marcha de Programas de Actividades de I+D, algunos de los cuales están relacionados en mayor o menor grado con la Nanociencia y la Nanotecnología, y cuya financiación ha sido aprobada recientemente por la Consejería de Educación. La Tabla 2 recoge aquellos proyectos aprobados en esta convocatoria que están relacionados con las Nanotecnologías. Es fácil constatar que más de sesenta grupos de investigación madrileños están involucrados en el desarrollo de estos Programas y que contarán con una financiación de casi 8,6 millones de Euros en cuatro años.

Las iniciativas anteriores, representando inversiones considerables si se considera que se partió de una situación de nulo apoyo a la Nanociencia y la Nanotecnología, son, sin embargo, insuficientes para mantener la competitividad del sistema de I+D dentro del Area Europea de Investigación. Cuando se calcula la financiación anual media recibida por cada grupo se encuentra una cantidad que se mueve entre los 35000 y 45000 Euros. Esta cantidad sirve escasamente para contratar a un investigador con el grado de doctor y no parece que sea suficiente para incrementar de forma significativa la competitividad de los grupos españoles. Se hace necesario mantener una tensión constante, propiciar el asentamiento de todas las iniciativas en marcha y la propuesta de otras nuevas, incrementando significativamente los fondos destinados a potenciar este campo estratégico, y, sobre todo, lograr que los gobernantes nacionales y regionales, los directivos de empresas de sectores estratégicos, y los nuevos emprendedores, se conciencien plenamente de que las Nanotecnologías pueden ser motor de la siguiente revolución industrial y económica, en la que debemos ocupar un puesto de preferencia. Sin duda alguna, la noticia de la creación de un Instituto Madrileño de Nanotecnología o la posible puesta en marcha de un Instituto Nacional dedicado a Nanotecnología, posiblemente ubicado en la Comunidad de Madrid, permitirán a esta Comunidad mantener su liderazgo en el área de las Nanotecnologías.

Aceptar la invitación para coordinar este Monográfico ha sido fácil porque no supone más que seguir en la línea que desde hace tiempo nos hemos marcado al liderar iniciativas como las Redes Nanociencia y NanoSpain, o las conferencias "Trends in Nanotechnology" (TNT), entre otras. Estas iniciativas nos han proporcionado una sólida atalaya desde la que hemos seguido y potenciado activamente la evolución de la Nanotecnología en España a lo largo de casi siete años. El rumbo que hemos seguido hasta la fecha nos ha permitido dar a conocer tanto el conocimiento desarrollado en la ciencia de la escala del nanómetro, como que dicho conocimiento se realiza también por grupos competitivos españoles, que en la mayoría de los casos no tienen un entorno

productivo al que transferir las ideas que generan. Con la misma intención, la de dar a conocer lo que se hace en los laboratorios de Universidades y Organismos Públicos de Investigación de la Comunidad Autónoma de Madrid, se ha configurado el presente Monográfico. El contenido del mismo tienen una estructura muy simple. En un primer bloque denominado “Visiones de la Nanotecnología” se han recogido una serie de opiniones de personas involucradas de distinta forma en acciones de promoción o gestión de la Nanotecnología a nivel internacional, nacional o regional. Sus opiniones corroborarán la impresión de que la actitud de las diversas Administraciones públicas ha cambiado paulatinamente y parece que la apuesta por la I+D en general, y la Nanotecnología en particular, es irreversible. En un segundo bloque se presentan contribuciones de algunos grupos de investigación de la Comunidad de Madrid para que describan los avances más recientes de diferentes “nanotemáticas” y cuál ha sido su contribución a las mismas. Nos hemos restringido a distintas áreas de trabajo de gran impacto y enorme potencial por lo que esperamos que los artículos presentados sean de interés para los lectores de este número de Madri+d. Hay que mencionar que, dado el potencial de la Comunidad de Madrid en el tema de la Nanotecnología, tal y como se recoge en la Tabla 2, se podría haber diseñado un Monográfico diferente, con otras contribuciones de igual calidad, o de un tamaño mucho mayor. Para finalizar este segundo bloque de artículos hemos incluido un par de trabajos orientados a analizar el impacto de la Nanotecnología en el ámbito económico y a facilitar una fotografía de los indicadores que reflejan la situación general de la Nanotecnología en España.

Antes de finalizar nos gustaría agradecer a Patricio Morcillo, Catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid, y Director de la revista Madri+d la invitación para coordinar este monográfico, así como a todos los autores que han contribuido a la preparación del mismo.

Tabla 2. Relación de Programas de Actividades de I+D entre Grupos de Investigación de la Comunidad de Madrid aprobados para el periodo 2006-2009 y que están relacionados directa o indirectamente con la Nanociencia y la Nanotecnología.

Referencia	Investiador Coordinador (número de grupos)	Acrónimo	Título del programa	Organismo	Financiación total 2006-2009 (Euros)
S-0505/MAT/000194	Rodolfo Miranda Soriano (5 grupos)	NANOMAGNET	Nanoestructuras magnéticas: fabricación, propiedades y aplicaciones biomédicas y tecnológicas	Universidad Autónoma de Madrid	959.998,70
S-0505/MAT/000227	Juan Baselga Llidó (8 grupos)	INTERFASES	Materiales nanoestructurados de base polimérica: fenómenos de interfase en relación con sus propiedades y aplicaciones avanzadas.	Universidad Carlos III de Madrid	613.786,80
S-0505/MAT/000283	José López Carrascosa (10 grupos)	NANOBIOS	Análisis de estructura y función de nanomáquinas y otros sistemas biológicos y su integración en dispositivos nanomecánicos mediante técnicas de manipulación de moléculas individuales	Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)	882.101,25

Tabla 2. Relación de Programas de Actividades de I+D entre Grupos de Investigación de la Comunidad de Madrid aprobados para el periodo 2006-2009 y que están relacionados directa o indirectamente con la Nanociencia y la Nanotecnología (Continuación)

Referencia	Coordinador (número de grupos)	Acrónimo	Título del programa	Organismo	2006-2009 (Euros)
S-0505/MAT/000303	Fernando Flores Sintas (8 grupos)	NANOOBJETOS	Propiedades mecánicas, eléctricas, y Catalíticas de Nanoobjetos: Síntesis, Caracterización y Modelización	Universidad Autónoma de Madrid	796.725,00
S-0505/MAT/000077	Francisco Javier Llorca Martínez (4 grupos)	ESTRUMAT	Materiales Estructurales Avanzados	Universidad Politécnica de Madrid	937.850,00
S-0505/TIC/000191	Fernando Cussó Pérez (5 grupos)	MICROSERES	Microsistemas ópticos sensores	Universidad Autónoma de Madrid	551.947,80
S-0505/PPQ/000225	Nazario Martín León (4 grupos)	MADRID SOLAR	Materiales Foto- y Electroactivos para Células Solares Orgánicas e Híbridas	Universidad Complutense de Madrid	892.659,70
S-0505/PPQ/000316	José María González Calbet (5 grupos)	MATFORFUN	Materiales avanzados basados en óxidos funcionales: relación entre tamaño de partícula, estructura y propiedades	Universidad Complutense de Madrid	706.300,00
S-0505/ESP/000200	Enrique Calleja Pardo (3 grupos)	NANOCOMIC	Nanoestructuras de semiconductores como componentes para la información cuántica	Universidad Politécnica de Madrid	734.373,95
S-0505/ESP/000337	Sebastián Viera Díaz (4 grupos)	CITEKNOMIK	Ciencia y tecnología en el milikelvin	Universidad Autónoma de Madrid	600.000,00
S-0505/ENE/000310	Antonio Luque López (9 grupos)	NUMANCIA	Nueva generación de materiales, dispositivos y estrategias fotovoltaicas para un mejor aprovechamiento de la energía del sol	Universidad Politécnica de Madrid	908.318,93
	Total grupos 65		Total Programas "nano": 12		Total financiación (Euros) 8.584.062,13

Antonio Correia
Fundación Phantoms, Pabellón C,
Campus de Cantoblanco

Juan José Sáenz
Departamento de Física de la Materia Condensada, C-III,
Universidad Autónoma de Madrid

Pedro A. Serena
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid,
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Tribuna de debate

Nanociencia: Manipulación a escala atómica y molecular

Blanca Biel

Fernando Flores

fernando.flores@uam.es

Dpto. Física Teórica de la Materia Condensada, C-III
Universidad Autónoma de Madrid, 28049-Madrid

Óscar Custance

Graduate School of Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-Oka, 565-0871 Suita,
Osaka, Japan

Iván Brihuega

Pedro J. de Pablo

Julio Gómez-Herrero

Cristina Gómez-Navarro

José María Gómez-Rodríguez

Laboratorio de Nuevas Microscopías,
Dpto. Física de la Materia Condensada, C-III
Universidad Autónoma de Madrid, 28049-Madrid

resumen

El invento de la microscopía de proximidad ha permitido la manipulación individual de átomos y moléculas con el objetivo de conformar sistemas funcionales nanométricos que constituyen el núcleo de la Nanociencia. En este artículo presentamos ejemplos de manipulación atómica, partiendo del artículo pionero de Eigler para el Xe sobre Ni y continuando con experimentos recientes en superficies semiconductoras desarrollados por investigadores procedentes del Laboratorio de Nuevas Microscopías. Finalmente se muestra cómo la creación de unos pocos defectos mediante irradiación con Ar^+ permite ajustar la conductancia de nanotubos de carbono metálicos.

palabras clave

Microscopías de efecto túnel y fuerzas

Manipulación atómica

Nanotubos de carbono

abstract

The invention of scanning probe microscopy has allowed the manipulation of individual atoms and molecules aiming at forming nanometric functional systems that will be the cornerstone of Nanoscience. In this paper we present some examples of atomic manipulation, starting from the seminal work by Eigler for Xe on Ni and following with recent experiments on semiconducting surfaces carried out by some Spanish researchers. Finally it is shown how the creation of a few defects by Ar^+ irradiation on metallic carbon nanotubes allows to tune their conductance.

keywords

Scanning Probe Microscopies

Atomic Manipulation

Carbon Nanotubes

1. INTRODUCCIÓN

El avance y desarrollo de la microelectrónica en los últimos 30 años ha revolucionado nuestro mundo cotidiano a través de los ordenadores y los distintos dispositivos que llenan nuestras vidas. La ley de Moore (que indica una reducción a la mitad del tamaño de los dispositivos electrónicos cada dos años) sugiere que alcanzaremos el tamaño nanométrico en esos sistemas en unos 15 años. Si esta predicción se cumpliera, en ese momento estaríamos manejando la materia al nivel de sus componentes moleculares de forma que, como consecuencia, utilizaríamos las moléculas individuales como componentes de lo que ya se llama apropiadamente la “electrónica molecular”.

La nanociencia (y en sus términos más generales, la nanotecnología) aborda este límite de lo nanométrico e investiga la posibilidad de que podamos manipular no sólo moléculas nanométricas sino también átomos individuales. La línea de investigación que espera llegar a este límite reduciendo sucesivamente (de acuerdo con la ley de Moore) el tamaño de los “dispositivos” que manejamos hoy día, se conoce como la línea, o el enfoque, “*top-down*” (de arriba abajo). Sin embargo, con el descubrimiento del Microscopio Túnel por Binnig y Rohrer hacia 1980 (Binnig, 1982), aparece lo que ha venido en llamarse el enfoque “*bottom-up*”, por el cual se estudia cómo manipular sistemas cada vez más complejos, partiendo de átomos y moléculas elementales, con el objetivo de conformar sistemas funcionales moleculares que constituyan el núcleo de la citada “electrónica molecular”.

Si el invento del Microscopio Túnel (STM), y unos años más tarde del Microscopio de Fuerzas Atómicas (AFM) por Binnig y Quate (Binnig, 1986), representa el comienzo de la nanociencia (al poderse, por primera vez, “ver” átomos depositados en superficies), un trabajo fundamental de Eigler y Schweizer en 1990 abre definitivamente la era de la manipulación atómica y molecular.

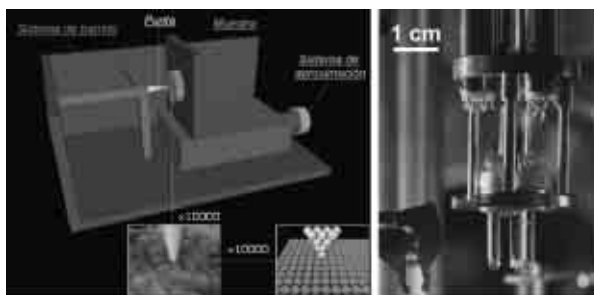
El objetivo de este artículo es presentar brevemente algunas ideas básicas y algunos ejemplos sobre lo que se ha conseguido actualmente en el desarrollo de la “ruta” de la manipulación atómica y molecular. Describiremos, primero el experimento de Eigler y Schweizer (Eigler, 1990) y mencionaremos, después, distintas formas de manipulación. En particular, daremos algunos ejemplos de lo realizado en

nuestros laboratorios y, finalmente, discutiremos una forma complementaria de manipular las propiedades de la materia (con el ejemplo de los nanotubos de carbono) irradiando con iones; mostraremos cómo la resistencia de estos nanotubos (moléculas orgánicas que pueden jugar el papel de los hilos conductores de la electrónica molecular) puede ajustarse adecuadamente con esa irradiación.

2. EL MICROSCOPIO TÚNEL Y LA MANIPULACIÓN DE ÁTOMOS Y MOLÉCULAS

La figura 1 presenta un esquema del funcionamiento del microscopio, basado en el control de la corriente que, por efecto túnel, aparece entre la punta del microscopio y una superficie metálica cuando se aplica un pequeño voltaje entre ambas (alrededor de una décima de voltio). Típicamente, controlando esta corriente se ajusta, con un piezoeléctrico, la distancia punta-muestra a un nanómetro con una precisión de 0.01 nanómetros. La punta se mueve, en el modo corriente, a lo largo y ancho de la superficie manteniendo la corriente constante (para un voltaje fijo); de esta forma se obtiene un mapa de la corrugación superficial con detalles de su estructura atómica (lo que se debe a la fuerte localización espacial de la corriente túnel).

Figura 1. Esquema de un STM (izquierda) y fotografía del STM de ultra-alto vacío y de temperatura variable (40-400 K) completamente diseñado y construido en el LNM (Custance, 2003).



La figura 2 muestra la secuencia de imágenes obtenidas por Eigler y Schweizer (Eigler, 1990) en el proceso de manipulación de átomos de Xe depositados sobre una superficie de Ni(110). Inicialmente vemos unos 70 átomos, puntos brillantes distribuidos aleatoriamente en la superficie;

posteriormente cada átomo es manipulado y desplazado a la posición adecuada hasta formar el logo IBM (procesos a,b...f). En cada caso, los átomos se manipulan de la siguiente forma: primero se coloca la punta sobre el átomo de Xe en el modo de lectura; después se acerca la punta al Xe hasta casi tocarlo y se arrastra el átomo a la posición elegida; finalmente, se retira la punta dejando el átomo de Xe en la superficie. En un trabajo teórico de uno de nosotros (Cerdá, 1992), se demostró que este proceso es debido a las fuerzas van der Waals que actúan entre la punta de W y el átomo Xe: en este caso, el Xe es desplazado a lo largo de la superficie por la fuerza de arrastre de la punta. Las fuerzas van der Waals no son tan fuertes, sin embargo, para pegar el Xe a la punta de W, sino que dan lugar sólo a una pequeña fuerza de arrastre que es la que permite la manipulación conseguida en el experimento.

Figura 2. Proceso de escritura con átomos de Xe sobre una superficie de Ni(110) mediante STM (Eigler, 1990).

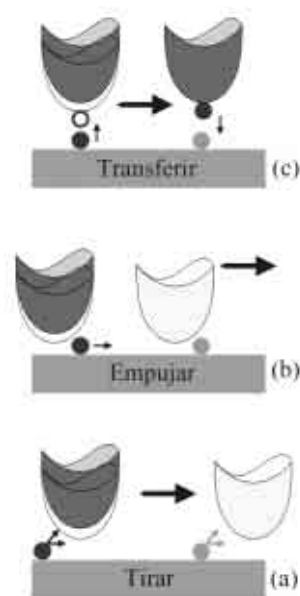


Dependiendo de las fuerzas entre los átomos adsorbidos y la punta el proceso de manipulación atómica puede ser diferente. En la figura 3 se muestran algunos de estos modos: en el caso a, la punta tira de la muestra (es el caso del Xe); en el caso b, la punta empuja a los átomos (es el caso utilizado para mover moléculas); en el caso c, los átomos se extraen y depositan en la superficie aplicando a veces un voltaje externo adecuado que promueve el salto de los átomos entre la punta y la muestra.

Un ejemplo de manipulación atómica con STM relacionado con el modo (c) de la figura 3 se ha realizado en el Laboratorio de Nuevas Microscopías (LNM) del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad Autónoma de Madrid (Brihuega, 2004). La superficie escogida para este estudio fue la cara (111) del germanio, la cual presenta una reestructuración de los átomos en la superficie

(esta reconstrucción se denota como $c(2 \times 8)$). Mediante leves contactos controlados entre la punta del STM y la muestra se pueden extraer átomos de la superficie, creando así vacantes individuales (figura 4). Una vez creadas, estas vacantes se mueven por activación térmica de forma espontánea entre distintas posiciones de la red de la superficie. Este tipo de fenómenos de difusión superficial tiene una importancia fundamental en la estabilidad de dispositivos de tamaño nanométrico e influye de forma directa en numerosos procesos que tienen lugar en las superficies de los sólidos: crecimiento de láminas delgadas, reacciones, catálisis, etc. En el presente trabajo, para estudiar cuantitativamente este proceso de difusión, se ha utilizado un STM de ultra-alto vacío y de temperatura variable (entre 40 y 400 K) completamente diseñado y construido en el LNM (figura 1). Gracias a él se han podido estudiar recientemente diversos procesos de difusión superficial (Custance, 2003; Brihuega, 2004), transiciones de fase en superficies (Brihuega, 2005a; Brihuega, 2005b) y propiedades electrónicas (Paz, 2005).

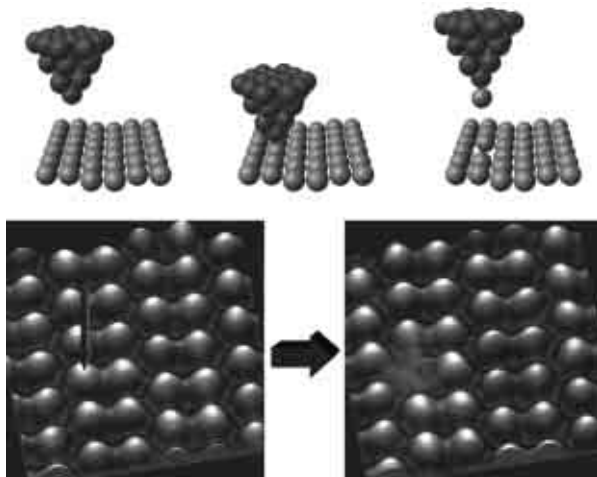
Figura 3. Esquema que muestra algunos modos de manipulación atómica con STM.



La figura 4 ilustra el proceso de creación de la vacante. Una vez que se ha creado la vacante, su evolución temporal (difusión por la superficie) puede seguirse por medio de "películas de STM", esto es, secuencias de imágenes de STM

medidas en la misma región de la superficie. La figura 5 muestra tres imágenes extraídas de una de estas películas en las que se puede observar la difusión de la vacante entre varias posiciones de la red de átomos de la superficie. Estas posiciones se pueden registrar de forma que se obtengan diagramas como el que se muestra en la misma figura 5. Del análisis estadístico de estos diagramas se puede concluir que el movimiento de la vacante corresponde al de un camino aleatorio en dos dimensiones que presenta una cierta anisotropía (Brihuega, 2004). La realización de un número muy elevado de este tipo de medidas a distintas temperaturas (superiores e inferiores a la temperatura ambiente) permitió extraer los coeficientes de difusión en función de la temperatura y de ellos las barreras energéticas correspondientes a la migración de estas vacantes individuales.

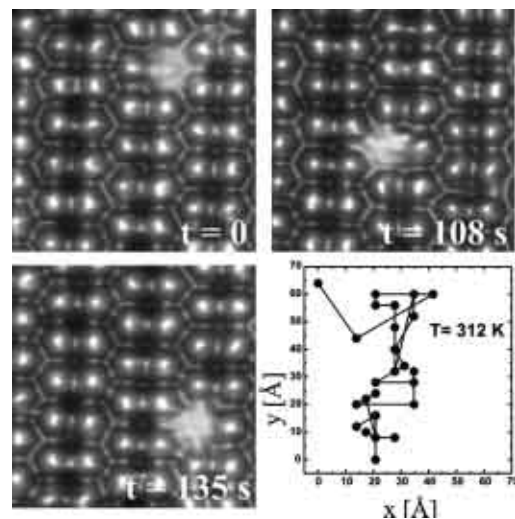
Figura 4. Esquema del proceso de extracción de un átomo de una superficie de Ge(111)-c(2x8) e imágenes de STM antes (izquierda) y después (derecha) de la extracción. El tamaño de las imágenes es 4.7nm x 4.7nm (Brihuega, 2004).



Como se verá a continuación, el conocimiento de estas barreras energéticas puede resultar de vital importancia para estimar la estabilidad de una nanoestructura creada artificialmente, puesto que valores de energías de difusión relativamente bajos para una superficie semiconductor (menores de 1 eV) como en el caso presente (Brihuega, 2004) pueden conducir al desorden de la misma a temperatura ambiente en tiempos del orden de pocos segundos. Éste ha

sido el motivo por el cual la mayor parte de los experimentos de manipulación controlada de átomos con STM se ha llevado a cabo en condiciones criogénicas.

Figura 5. Imágenes extraídas de una película de STM que ilustran la difusión de una vacante creada artificialmente. El diagrama de la parte inferior derecha muestra todas las posiciones ocupadas por la vacante en un tiempo total de 405 s (Brihuega, 2004).



Como otro ejemplo reciente de manipulación atómica, nos referiremos aquí al trabajo realizado por uno de nosotros en la Universidad de Osaka en el que se ha propuesto un nuevo método para abordar la creación, átomo a átomo y a **temperatura ambiente**, de nanoestructuras en superficies semiconductoras mediante procesos de manipulación utilizando un microscopio de fuerzas atómicas (AFM). En este trabajo se ha demostrado, por primera vez, la posibilidad de manipular lateralmente átomos individuales a temperatura ambiente con una precisión equivalente a la obtenida en experimentos de STM a temperaturas criogénicas y, adicionalmente, que las nanoestructuras artificiales así creadas permanecen estables sobre la superficie durante relativamente largos intervalos de tiempo (Sugimoto, 2005).

El AFM es un microscopio de proximidad basado en la detección de la fuerza que actúa entre la punta del microscopio y una superficie sea metálica o aislante. A diferencia del STM, el AFM es capaz de producir imágenes con resolución atómica real no solo de superficies metálicas y

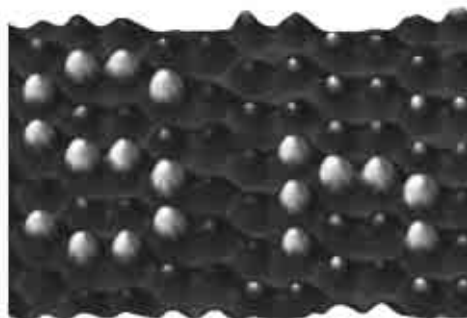
semiconductoras como el STM, sino también de superficies aislantes. Con el AFM se puede llegar a detectar y medir la fuerza química de corto alcance –el enlace químico– entre el último átomo del extremo de la punta y los átomos en una superficie, siendo esta fuerza la responsable última de la obtención de la resolución atómica real con un AFM. El modo de operación utilizado mide el cambio en la frecuencia de resonancia durante la oscilación forzada de la punta y se conoce como microscopía de fuerzas en modo de no-contacto (NC-AFM); sólo hay unos pocos grupos en el mundo –la mayoría concentrados en Alemania y Japón– que han conseguido desarrollar esta tecnología y obtener resolución atómica real con NC-AFM en ultra-alto vacío. En España, en concreto, no se dispone todavía de esta técnica.

Experimentos previos de manipulación realizados en el grupo de Osaka utilizando NC-AFM a temperaturas criogénicas (Oyabu, 2003; Oyabu, 2005) proporcionaron las claves para la consecución de la manipulación lateral de átomos individuales de Sn en una superficie Ge(111)-c(2x8). En este sistema, los átomos de Sn presentan un mayor contraste que los de Ge (figura 6), indicando la existencia de una mayor fuerza de interacción química (atractiva) de los primeros con el último átomo de la punta. Utilizando esta propiedad desarrollamos un método de manipulación que permite un control absoluto sobre la dirección en la que los átomos de Sn pueden ser desplazados. Este método nos permitió crear la primera estructura artificial formada por unos pocos átomos embebidos en una superficie a **temperatura ambiente** (figura 6). Una selección de imágenes secuenciales, agrupadas en forma de película, adquiridas durante el proceso de recolocar lateralmente átomos de Sn para crear la nanoestructura que se muestra en la figura 6 puede descargarse de <http://www.nature.com/nmat/journal/v4/n2/supinfo/nmat1297.html>.

Las medidas que hemos realizado para caracterizar la estabilidad de estos átomos sustitucionales de Sn en la superficie de Ge a temperatura ambiente indican un coeficiente de difusión esperado menor de 5.7×10^{-7} intercambios por átomo de Sn y por segundo. Este dato permite estimar la vida media mínima de las nanoestructuras creadas en esta superficie con el método que hemos propuesto. Si consideramos que la nanoestructura se destruye cuando uno solo de los átomos abandona su posición en un proceso espontáneo de difusión y, ateniéndonos a que estos procesos son estadísticamente independientes, la vida media

mínima esperada para la nanoestructura de la figura 6 es mayor de 25 horas. El hecho de que las estructuras permanezcan estables a temperatura ambiente durante intervalos de tiempo relativamente largos plantea la posibilidad de aplicar esta técnica de manipulación atómica en dispositivos tecnológicos. Un ejemplo de aplicación inmediata sería el dopaje selectivo, local y ordenado en patrones de las puertas (“gates”) en transistores de tipo MOSFET, en los que recientemente se ha demostrado que posicionar los dopantes en estructuras ordenadas –en contraste con el dopaje aleatorio actual– incrementa las prestaciones del dispositivo (Shinada, 2005).

Figura 6. Nanoestructura que forman las letras del símbolo químico del estaño creadas artificialmente sobre una superficie de germanio mediante la manipulación individual de átomos de estaño a temperatura ambiente utilizando un microscopio de fuerzas atómicas (Sugimoto, 2005).



3. AJUSTANDO LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE NANOTUBOS DE CARBONO

Hasta ahora hemos descrito como realizar modificaciones a escala atómica usando la punta de un STM o de un AFM. En lo que sigue vamos a ver cómo la introducción controlada de unos pocos defectos atómicos en un nanotubo de carbono nos permite ajustar su resistencia eléctrica abriendo las puertas a futuras aplicaciones tecnológicas en electrónica molecular.

Los nanotubos de carbono fueron descubiertos por S. Iijima en 1991 (Iijima, 1991). Para definir un nanotubo de carbono lo mejor es construirlo partiendo de una lámina de un cristal de grafito. En esta lámina los átomos de carbono se disponen

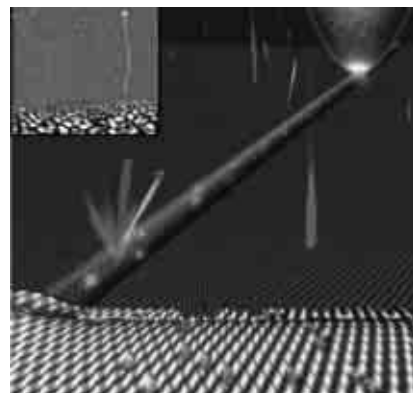
en los vértices de los hexágonos de una red con forma de panal de abeja. Estas láminas son el elemento básico para construir geoméricamente un nanotubo de carbono. Para ello basta con plegar la lámina hasta formar un cilindro: el ancho de la lámina define el diámetro del nanotubo. Un punto sutil, pero extremadamente importante para las propiedades electrónicas de los nanotubos, es que dependiendo de la dirección del plegado los nanotubos pueden ser metálicos o semiconductores, lo que es una propiedad sumamente interesante para la construcción de circuitos electrónicos. De hecho ya se ha construido un transistor de efecto de campo basado en las propiedades de nanotubos semiconductores (Tans, S.J., 1998). Además los nanotubos, metálicos soportan una elevada densidad de corriente: un nanotubo con una sección de alrededor de 1 nm^2 permite corrientes de más de 10 mA , ($j=10^{13} \text{ A/m}^2$). Un conductor clásico como el cobre, usado frecuentemente en microelectrónica, soporta densidades de corriente máximas 100 veces menores. Por estas razones los nanotubos son contemplados como uno de los posibles constituyentes básicos de una futura electrónica molecular por lo que entender sus propiedades es una prioridad básica en el campo de la Nanotecnología.

En un nanotubo estructuralmente perfecto, a baja temperatura y bajos voltajes los electrones se mueven libremente sin colisiones con los defectos, vibraciones de la red o con otros electrones del sistema. En este caso un nanotubo metálico es un conductor ideal unidimensional y su régimen de conducción se denomina balístico (los electrones se mueven como partículas independientes a lo largo del nanotubo). En este régimen la resistencia del nanotubo es la mínima permitida por la mecánica cuántica: $1/2R_0$ ($R_0 = h/2e^2 \approx 13k\Omega$. R_0 es el llamado cuanto de conductancia); el factor $1/2$ indica que los nanotubos tienen dos canales de conducción en paralelo a lo largo de su eje y cada canal presenta la resistencia ideal R_0 . Si el nanotubo no es perfecto su resistencia va siempre a aumentar, En este contexto, el entender como la resistencia de los nanotubos depende de las impurezas es importante porque ofrecería una posibilidad de ajustar la conductancia del sistema a la situación concreta que más interese.

Recientemente hemos realizado un trabajo de investigación en donde se demuestra la posibilidad de controlar la resistencia de nanotubos de capa única mediante irradiación con iones de Ar^+ de baja energía ($\sim 100 \text{ eV}$) (Gómez-Navarro, 2005). Cálculos teóricos (Krasheninnikov, 2002) indican que estos

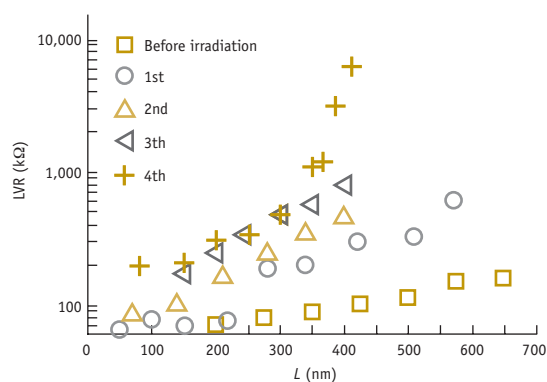
iones al chocar con el nanotubo arrancan átomos de carbono creando monovacantes y divacantes en una proporción de aproximadamente $1/2$. El experimento comienza por la adsorción y posterior contacto eléctrico de los nanotubos con un electrodo macroscópico de oro (fig 7). Por medio de un AFM, dotado con una punta metálica, realizamos una imagen de la muestra localizando aquellos nanotubos que estaban parcialmente recubiertos por el electrodo de oro. A su vez, esta punta metálica nos permite, realizar contactos eléctricos en un gran número de nanotubos, hasta localizar uno que tenga carácter metálico y con un diámetro inferior a 1.5 nm . Repitiendo el contacto eléctrico en varios puntos a lo largo del nanotubo establecemos la dependencia de la resistencia eléctrica del nanotubo con la distancia $R(L)$ a bajos voltajes, (a bajos voltaje el choque de los electrones con los defectos es, con muy buena aproximación, elástico en un nanotubo). A continuación sometemos a la muestra a un dosis de irradiación con Ar^+ y volvemos a medir $R(L)$ para el mismo nanotubo. Este proceso es convenientemente repetido hasta obtener la gráfica de la figura 8 donde se ve la resistencia del nanotubo crece exponencialmente con la distancia y con la dosis de irradiación.

Figura 7. En la figura se aprecia de manera esquemática un nanotubo contactado entre un electrodo de oro macroscópico y una punta conductora que se desplaza a lo largo del nanotubo. Los puntos claros a lo largo del nanotubo representan los defectos creados por los iones de argón que también han sido representados en el dibujo. El cuadro insertado es un nanotubo contactado con el electrodo macroscópico tal y como lo muestra un microscopio de fuerzas atómicas. La imagen tiene un tamaño de $(1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm})$ (Gómez-Navarro, 2005)



Para entender estos resultados hay que tener en cuenta la rica fenomenología que muestran los sistemas unidimensionales en presencia de defectos. En particular si en un conductor unidimensional con un único canal de conducción introducimos defectos, su conductancia G (el inverso de la resistencia; $G_0 = 1/R_0$) cambia con el coeficiente de transmisión del canal: $G = G_0 T$, aquí la transmitividad T será 1 en el caso del conductor libre de defectos y entre 0 y 1 en presencia de defectos (0 indicaría un canal con tantos defectos que ya no conduce). En un conductor unidimensional en los que los electrones choquen elásticamente con los defectos aparece un efecto cuántico interesante: debido a la naturaleza ondulatoria de los electrones estos colisionan con defectos produciendo múltiples interferencias. La transmitividad del canal y por lo tanto su conductividad (o su resistencia) va a depender de estas interferencias. Como consecuencia de esto la variación de la resistencia eléctrica con la longitud del conductor $R(L)$ tiene una dependencia complicada con la densidad de defectos (el número de defectos por unidad de longitud), cambiando drásticamente con la manera en que estos se distribuyan a lo largo del conductor (configuración). Sin embargo la magnitud $\langle \ln(R(L)) \rangle$ depende linealmente con L . Esta magnitud es el promedio logarítmico de la resistencia de muchos conductores unidimensionales con la misma densidad de defectos, pero cada uno de ellos con una configuración distinta. Este régimen de transporte se denomina de localización fuerte de Anderson. Por el contrario, si los choques son inelásticos se pierde la coherencia electrónica y con ello los efectos de interferencia, recuperándose el resultado clásico de la ley de Ohm para la resistencia del conductor.

Figura 8. Variación de la resistencia a lo largo de un nanotubo para distintas dosis de radiación (Gómez-Navarro, 2005).



La comparación de los datos experimentales con cálculos detallados, usando una combinación de técnicas de funcional de la densidad y funciones de Green, indica que efectivamente los nanotubos se encuentran en el régimen de localización fuerte de Anderson por el efecto dominante de las divacantes, de tal manera que si aproximadamente 1 de cada 4 iones de Ar^+ creara una divacante se obtendría el aumento de resistencia observado en los experimentos. Esto está en buen acuerdo con los cálculos realizados independientemente sobre la influencia de la irradiación de iones de Ar^+ en nanotubos. Los cálculos teóricos también muestran como la temperatura produce un efecto de promediado similar al producido por el promedio en configuraciones, por lo que a temperatura ambiente la dependencia de la resistencia con la distancia para un nanotubo sigue una ley exponencial (Biel, 2005).

Además, a partir de la medida de la corriente de iones y del tiempo de aplicación de la dosis se puede fácilmente estimar que tan solo un 0.1% de defectos, incluyendo monovacantes y divacantes, producen un aumento de 2 órdenes de magnitud a lo largo de una longitud de nanotubo de 400 nm. No obstante, como solo las divacantes contribuyen significativamente al aumento de la resistencia, concluimos que basta con introducir aproximadamente 3 divacantes cada 10000 átomos de carbono para aumentar 2 órdenes de magnitud la resistencia eléctrica de un nanotubo de 400 nm de longitud. Estos resultados son una indicación clara de la importancia de los defectos en las propiedades de transporte eléctrico de los nanotubos y de cómo usarse la irradiación iónica para su control.

4. COMENTARIOS FINALES

En este artículo se han mostrado algunos ejemplos de manipulación de superficies con STM y AFM a la escala atómica. Asimismo, se ha explicado cómo la creación controlada de unos pocos defectos atómicos mediante irradiación con Ar permite ajustar a voluntad la resistencia de los nanotubos de carbono. El control a nivel nanométrico de la materia, como aquí se ha ilustrado, será sin duda un elemento central en la futura Nanotecnología.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean mostrar su agradecimiento a la empresa española Nanotec Electrónica S.L. por su continuo apoyo técnico. El programa informático WSxM, de esta compañía, ha sido utilizado en la adquisición, proceso y representación de los datos medidos en las Universidades Autónoma de Madrid y de Osaka. Este programa, distribuido gratuitamente a la comunidad científica, es una iniciativa española para fomentar el desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología.

BIBLIOGRAFIA

- BIEL, B.; GARCÍA-VIDAL, F.J.; RUBIO, A.; FLORES F., "Anderson Localization in Carbon Nanotubes: Defect Density and Temperature Effects", *Phys. Rev. Lett.* 95, 266801 (2005)
- BINNIG, G.; ROHRER, H.; GERBER, Ch.; WEIBEL, E., "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 49, 57 (1982).
- BINNIG, G.; QUATE, C.F.; GERBER, Ch., "Atomic Force Microscope", *Phys. Rev. Lett.*, 990 (1986).
- BRIHUEGA, I.; CUSTANCE, O.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J.M., "Surface Diffusion of Single Vacancies on Ge(111)-c(2x8) Studied by Variable Temperature Scanning Tunneling Microscopy", *Phys. Rev. B* 70, 165410 (2004).
- BRIHUEGA, I.; CUSTANCE, O.; PÉREZ, R.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J.M., "Intrinsic Character of the (3x3) to (√3x√3) Phase Transition in Pb/Si(111)", *Phys. Rev. Lett.* 94, 046101 (2005).
- BRIHUEGA, I.; CUSTANCE, O.; UGEDA, M.M.; OYABU, N.; MORITA, S.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J.M., "Direct Observation of a (3x3) Phase in Alpha-Pb/Ge(111) at 10K", *Phys. Rev. Lett.* 95, 206102 (2005).
- CERDÁ, J.R.; DE ANDRES, P..L.; FLORES, F.; PÉREZ, R., "Transport of Physisorbed Xe Atoms on Ni(1110) Using a Scanning Tunneling Microscope: A Theoretical Approach", *Phys. Rev. B* 45, 8721 (1992).
- CUSTANCE O.; BROCHARD, S.; BRIHUEGA, I.; ARTACHO, E.; SOLER, J.M.; BARÓ, A.M.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J.M., "Single Adatom Adsorption and Diffusion on Si(111)-(7x7) Surfaces: Scanning Tunneling Microscopy and First-Principles Calculations", *Phys. Rev. B* 67, 235410 (2003).
- EIGLER, D.M.; SCHWEIZER, E.K., "Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope", *Nature* 344, 524 (1990).
- GOMEZ-NAVARRO, C.; DE PABLO P.J.; GÓMEZ-HERRERO, J.; BIEL, B.; GARCÍA-VIDAL, F.J.; RUBIO, A.; FLORES F., "Tuning the conductance of single-walled carbon nanotubes by ion irradiation in the Anderson localization regime". *Nature Materials*, 4(7), 534 2005
- IJJIMA, S., "Helical Microtubules of Graphitic Carbon". *Nature* 354(6348): 56. (1991)
- KRASHENINNIKOV, A. V.; NORDLUND K.; KEINONEN, J., "Production of defects in supported carbon nanotubes under ion irradiation." *Physical Review B* 65(16), 2002
- PAZ, O.; BRIHUEGA, I.; GÓMEZ-RODRÍGUEZ, J.M.; SOLER, J.M., "Tip and Surface Determination from Experiments and Simulations of Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* 94, 056103 (2005).
- OYABU, N.; CUSTANCE, O.; YI, I.; SUGAWARA, Y.; MORITA, S., "Mechanical Vertical Manipulation of Selected Single Atoms by Soft Nanoindentation Using Near Contact Atomic Force Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 90, 176102 (2003).
- OYABU, N.; SUGIMOTO, Y.; ABE, M.; CUSTANCE, O.; MORITA, S., "Lateral manipulation of single atoms at semiconductor surfaces using atomic force microscopy", *Nanotechnology* 16, S112 (2005).
- PENDRY, J. B., "Symmetry and Transport of Waves in One-Dimensional Disordered Systems." *Advances in Physics* 43(4), 461 (1994)
- SUGIMOTO, Y.; ABE, M.; HIRAYAMA S.; OYABU, N.; CUSTANCE, O.; MORITA, S., "Atom inlays performed at room temperature using atomic force microscopy", *Nature Materials* 4, 156 (2005).
- SHINADA, T.; OKAMOTO S.; KOBAYASHI T.; OHDOMARI I., "Enhancing semiconductor device performance using ordered dopant arrays", *Nature* 437, 1128 (2005).
- TANS, S.J.M.; VERSCHUEREN, A. R.; DEKKER C., "Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube", *Nature*, 393, 49-52 (1998)

Efectos de tamaño cuántico y su importancia para la reactividad y estabilidad de nanoestructuras

Rodolfo Miranda

Laboratorio de Superficies
Departamento de Física de la Materia Condensada e Instituto Nicolás Cabrera
Universidad Autónoma de Madrid
rodolfo.miranda@uam.es

resumen

En la base misma de la nanociencia está el concepto de que la materia muestra nuevas propiedades si reducimos su tamaño, por debajo de una cierta longitud crítica. Detrás de este concepto esta el hecho de que el confinamiento electrónico produce la aparición de un conjunto nuevo de estados cuánticos discretos, llamados Estados de Pozo Cuántico, cuya ocupación secuencial por los electrones resulta en que muchas propiedades físicas oscilen con el tamaño del objeto. Esto es lo que se conoce como Efectos de Tamaño Cuántico: Aquí se describen efectos de este tipo en lo que refiere a la reactividad química y a la estabilidad de nanoestructuras.

palabras clave

Efectos de Tamaño Cuántico
Estados de Pozo Cuántico
Microscopía de Efecto Túnel

abstract

At the basis of nanoscience lies the concept that a piece of matter shows new properties if its size is reduced (at least in one spatial dimension) below a certain critical length. Behind this concept is the fact that electron confinement leads to the appearance of a new set of discrete quantum states, the Quantum Well States, which are sequentially occupied by electrons resulting in quantum oscillations of many properties with the size of the system. These are known as Quantum Size Effects. Here we describe some effects of this kind, related to the chemical reactivity and the thermal stability of nanostructures.

keywords

*Quantum Size Effects
Quantum Well States
Scanning Tunnelling Microscope*

1. PROPIEDADES QUE DEPENDEN DEL TAMAÑO Y ESTADOS DE POZO CUÁNTICO

En los últimos años la nanociencia y nanotecnología se ha convertido en una de las más importantes y excitantes fronteras científicas, donde confluyen la Física, la Química, la Biología y la Ingeniería. Mientras que la palabra nanotecnología es relativamente nueva, la existencia de dispositivos funcionales y estructuras de dimensiones nanométricas, no lo es. De hecho, estructuras de este tipo han existido en la Tierra desde que existe la vida. La concha del molusco *avalón*, muy común en el Caribe, que presenta una dureza excepcional, está compuesta por bloques nanoestructurados de carbonato cálcico “pegados” por una mezcla de carbohidratos y proteínas y es una demostración viva de que los materiales nanoestructurados son mecánicamente más resistentes. Los humanos hemos aprovechado los materiales nanoestructurados desde hace mucho tiempo. Los vidrieros romanos fabricaban vidrios con nanopartículas metálicas ya en el siglo IV antes de Cristo. La copa de Licurgo es un bello objeto de vidrio que se encuentra en el Museo Británico en Londres y contiene partículas de Au y Ag de unos 50-70 nanómetros (10^{-9} metros) de diámetro distribuidas en el interior del vidrio. Estas nanopartículas hacen, como muestra la Figura 1, que la copa se vea *verde* cuando se ilumina con luz reflejada y *rojo* con luz transmitida (por ejemplo, al situar una fuente de luz en su interior). Un uso similar de nanopartículas para modificar el color del vidrio fue ampliamente empleado posteriormente en las vidrieras de catedrales. Asimismo el uso común de la fotografía ha dependido de la producción de nanopartículas de Ag sensibles a la luz. De modo que, a pesar de la excitación actual que provoca la Nanotecnología, el uso y estudio de materiales nanoestructurados no es realmente tan reciente.

Figura 1. Color cambiante de la Copa de Licurgo (verde con luz reflejada y rojo con luz transmitida) y una de las nanopartículas de Au que contiene el vidrio del que está hecha.



En estos tiempos de tanto debate improductivo sobre si es preferible financiar ciencia básica o aplicada, tal vez convenga recordar que la primera fotografía en color fue realizada por James Clark Maxwell, universalmente recordado por sus contribuciones a la teoría electromagnética, la cual, a su vez, tuvo una importancia trascendental para que en 1908 Gustav Mie explicara por qué el color de los vidrios dependía del tamaño y composición de las nanopartículas incluidas en ellos.

A lo largo de los años hemos ido generando evidencias experimentales de que los materiales se pueden estructurar a escala nanoscópica de modo que éstos muestren nuevas propiedades. Estas evidencias empíricas se basan en que las propiedades ópticas, magnéticas, mecánicas, electrónicas o químicas de la materia tienen longitudes características asociadas y, si producimos un trozo de materia de dimensiones *menores* que estas longitudes características (al menos en una dimensión), las propiedades de este trozo de materia nanoestructurado son muy diferentes de las del mismo material en forma volúmica. Por ejemplo, la conductividad eléctrica tiene asociada una longitud característica que se denomina “recorrido libre medio” y que representa la distancia promedio que un electrón recorre en el material antes de colisionar con impurezas o con los mismos átomos del material. Cuando un trozo de metal tiene alguna dimensión comparable o menor que el correspondiente “recorrido libre medio”, el transporte de electrones se convierte en balístico y no se cumple la conocida ley de Ohm. La necesidad de la ciencia básica a la nanoescala surge del hecho de que muchas de estas longitudes características se sitúan en el rango de unos pocos nanómetros y por tanto, las nuevas propiedades a la nanoescala no son escalables a partir de las leyes conocidas.

En el corazón de los cambios asociados al tamaño nanoscópico se encuentra el hecho de que, cuando los electrones están *confinados* en una región pequeña del espacio, sus estados accesibles están cuantizados. Estos estados discretos son conocidos como Estados de Pozo Cuántico (Quantum Well States) y su espaciamiento en energía depende muy notablemente del tamaño de la zona espacial en que estén confinados. Como el estado fundamental de un sistema físico es función de la densidad electrónica y ésta cambia abruptamente cada vez que una nueva banda de Estados de Pozo Cuántico (QWS) cruza el nivel de Fermi, hay que suponer que hay una gran cantidad de propiedades que dependerán del tamaño: Estos son los

llamados Efectos de Tamaño Cuántico. Los estados de Pozo Cuántico en películas metálicas de espesor nanométrico son responsables de un amplio rango de propiedades nuevas asociadas a las nanoestructuras. En particular, muchas propiedades *oscilan* con el tamaño con un periodo que es la mitad de la longitud de onda de Fermi (del orden del nanometro). Hay evidencia experimental de oscilaciones cuánticas con el espesor en muchas propiedades físicas de películas ultradelgadas, como la resistividad eléctrica (Jalochowski, 1988), el acoplamiento magnético oscilatorio (de Miguel, 1989; Ortega, 1992) y la magnetorresistencia gigante asociada, el coeficiente Hall (Jalochowski, 1996), la función de trabajo (Paggel, 2002) las distancias interplanares (Czoschke, 2003) o la temperatura de transición superconductor (Guo, 2004).

2. PROPIEDADES QUÍMICAS DE NANOESTRUCTURAS

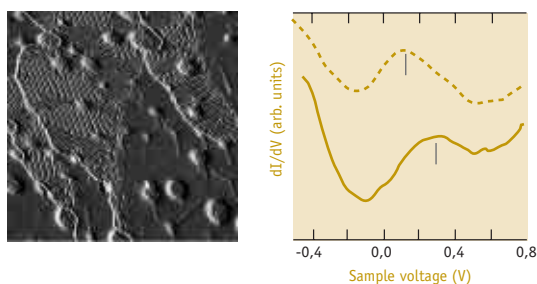
En lo que sigue vamos a ilustrar brevemente algunas de estas propiedades que dependen del tamaño, en particular la reactividad química y la estabilidad estructural de nanoestructuras. Un ejemplo paradigmático de propiedad que depende del tamaño es la reactividad química de nanopartículas de oro. Venimos usando oro para hacer joyas de hace milenios ya que el oro es, obviamente, uno de los metales menos reactivos. Esto es cierto en tanto las partículas de oro son relativamente grandes. Cuando los cristallitos de Au tienen un tamaño del orden de 3-5 nm se convierten en extraordinariamente reactivos y son capaces de oxidar CO, incluso a temperaturas del orden de 200 K (Haruta, 2000). Este descubrimiento ha conducido ya a la comercialización de productos para eliminar el olor en los cuartos de baño basados en nanopartículas de Au sobre un sustrato de Fe_2O_3 . Una evidencia experimental incuestionable sobre la diferencia en reactividad de partículas en función de su tamaño fue suministrada por Leuchtner y colaboradores al observar el espectro de masas de nanopartículas de Al que habían atravesado una región rica en oxígeno (Leuchtner, 1989). La altura relativa de los picos correspondientes a nanopartículas de Al_{13} y Al_{23} , menos reactivas, había aumentado substancialmente con respecto a la distribución inicial, mientras que los picos correspondientes a Al_{12} , Al_{14} y Al_{20} habían desaparecido del espectro, al ser estas partículas más reactivas. Una dependencia con el tamaño similar se ha encontrado para otros metales (p.ej. Fe) y otras reacciones (Whetten, 1985).

¿Qué es lo que produce la inesperada reactividad química al disminuir el tamaño de una partícula de oro? ¿Qué hace que nanopartículas de Al con 12 átomos sean mucho más reactivas que aquellas que contienen 13? Hallar la respuesta a estas preguntas tiene importantes implicaciones para el diseño de catalizadores más eficientes y selectivos. Es bien sabido que la estructura electrónica de un objeto material depende de su tamaño y estructura cristalina. Puesto que la reactividad química depende crucialmente de la estructura electrónica, es natural suponer que la reactividad de una nanopartícula dependerá de su tamaño y estructura cristalina.

Es, pues, importante determinar directamente la relación entre la estructura electrónica dependiente del tamaño y los posibles cambios en la reactividad química. A tal fin hay que realizar estudios detallados de los procesos químicos elementales en sistemas modelos, como las superficies de monocristales, en los que todas las variables se puedan mantener bajo control. En este caso podemos preparar películas ultradelgadas de distinto espesor atómico de un cierto material sobre un sustrato adecuado y determinar simultáneamente su estructura electrónica y reactividad en condiciones controladas de Ultra Alto Vacío (UAV), en las que sólo se expone la muestra a aquellas moléculas que uno desee. La parte izquierda de la Figura 2 muestra una imagen de Microscopía de Efecto Túnel (STM) de una película de Cu crecida in-situ sobre una superficie cristalina de Rutenio (Calleja, 2005). La película de Cu tiene un espesor de dos capas atómicas en su parte izquierda donde muestra una corrugación superficial característica. En la zona en que la película de Cu parece plana y homogénea, su espesor es sólo de una capa atómica. El microscopio de efecto túnel permite medir localmente cómo cambia la corriente túnel, I , al variar el voltaje entre punta y muestra, V ; cuya derivada (dI/dV) es proporcional a la distribución energética de los estados electrónicos en la muestra, conocida como Densidad de Estados. La parte derecha de la figura muestra los espectros obtenidos sobre zonas de la muestra con 1 y 2 capas de espesor, que corresponden a la Densidad de Estados electrónicos de la superficie. En estos espectros el cero de energía corresponde al nivel de Fermi y representa la máxima energía de los electrones en una muestra metálica. Los estados están ocupados por electrones para valores negativos de la energía y vacíos para valores positivos de esta escala. Tanto para 1 como para 2 monocapas, la mayor parte de los estados electrónicos están por encima del cero de energía,

por lo que están desocupados, pero esto ocurre en mucho mayor grado para 1 monocapa.

Figura 2. La imagen STM de la izquierda muestra la morfología de una película de Cu depositada sobre una superficie de Rutenio en una campana de Ultra Alto Vacío. La película tiene un espesor de dos monocapas atómicas en la zona corrugada y de sólo una monocapa en la zona homogénea de la imagen. La parte derecha de la figura muestra los correspondientes espectros de corriente túnel medidos, respectivamente, sobre zonas de una (línea discontinua) y dos (línea continua) capas de espesor. El cero de voltaje corresponde al nivel de Fermi.

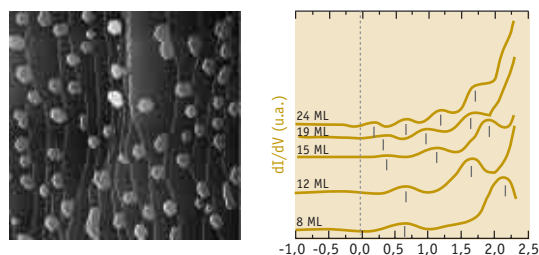


La reactividad química depende de la densidad de estados vacíos en la superficie, ya que las moléculas incidentes intercambian electrones básicamente con el estado de superficie. Así se ha demostrado que la probabilidad de capturar moléculas de oxígeno por la superficie de la Figura 2 es un orden de magnitud *mayor* en las áreas con dos capas de Cu de espesor que en las de una sola capa de espesor (Otero, 2004). Hay que destacar que aunque la superficie de estas películas está compuesta sólo por átomos de Cu, su reactividad es *tres* ordenes de magnitud mayor que la de la superficie de un cristal volúmico de Cu (Otero, 2004). Así pues, es posible modificar drásticamente la reactividad superficial mediante la adición de una o unas pocas capas de átomos a una superficie dada, lo que está permitiendo diseñar catalizadores más específicos y selectivos. De hecho, recientemente han entrado en funcionamiento catalizadores bimetalitos de Au-Ni diseñados por primera vez a partir de este conocimiento básico de la reactividad de nanoestructuras (Besenbacher, 1998).

3. ESTADOS DE POZO CUÁNTICO Y REACTIVIDAD QUÍMICA

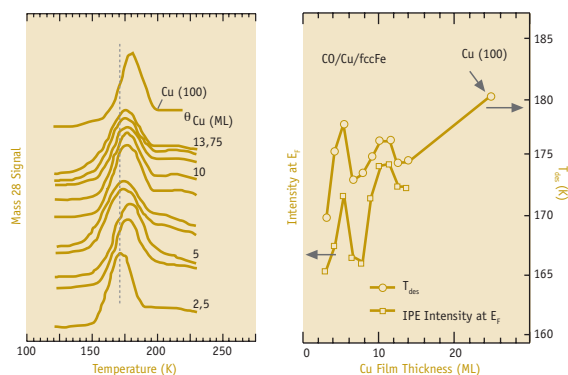
Cuando el espesor de la película metálica alcanza los nanómetros y si el sustrato es adecuado, las funciones de onda de los electrones se confinan en la dirección perpendicular al plano de la película y los estados electrónicos accesibles se discretizan. Estos Estados de Pozo Cuántico (QWS) se pueden observar experimentalmente mediante STM o Espectroscopia de Fotoemisión. La parte izquierda de la Figura 3 muestra espectros de la densidad de estados electrónicos medidos localmente sobre islas de Pb de diferente altura atómica crecidas a temperatura ambiente sobre la superficie de un monocristal de Cu. Los picos corresponden a los Estados de Pozo Cuántico (QWS). Nótese que la separación en energía entre los QWS se hace *menor* cuanto *mayor* es el espesor de la isla de Pb, de acuerdo con las predicciones de la mecánica cuántica para una partícula confinada en un pozo de potencial unidimensional de profundidad infinita y ancho creciente. Estos estados corresponden a la formación de ondas estacionarias en el pozo. Al cambiar el espesor de las islas los estados cruzan periódicamente el nivel de Fermi, por lo que la densidad de estados electrónicos al nivel de Fermi oscila con la misma periodicidad. La imagen STM del panel derecho de la Figura 3 muestra la morfología de estas islas de Pb nucleadas, en su mayor parte, en las proximidades de los escalones monoatómicos del cristal de Cu.

Figura 3. La parte izquierda de la figura muestra los espectros de la densidad de estados electrónicos medidos localmente sobre islas de Pb de diferente altura atómica crecidas a temperatura ambiente sobre la superficie de un monocristal de Cu. Los picos corresponden a los Estados de Pozo Cuántico. La imagen STM de la derecha muestra estas islas de Pb nucleadas, en su mayor parte, en las proximidades de los escalones monoatómicos del sustrato.



La reactividad química depende de la densidad de estados al nivel de Fermi. Al crecer películas ultradelgadas de Cu sobre un cristal de Fe, aparecen Estados de Pozo Cuántico que hacen oscilar la densidad de estados al nivel de Fermi al cambiar el espesor. El panel izquierdo de la Figura 4 muestra los espectros de desorción térmica de CO adsorbido en películas de Cu de distinto espesor crecidas sobre un cristal de Fe (Danese, 2004). La temperatura del máximo de desorción está relacionada con la energía de ligadura de la molécula adsorbida con la superficie. Nótese que esta temperatura *oscila* con el espesor de la película de Cu mostrando máximos para espesores de 5 y 10 monocapas. El panel derecho de la Figura 4 prueba que los *máximos* en la temperatura de desorción del CO están correlacionados con *máximos* en la densidad de estados al nivel de Fermi en la superficie producidos por los Estados de Pozo Cuántico. Por tanto la película es más reactiva cuando su densidad de estados electrónicos al nivel de Fermi es mayor. Resultados similares se han obtenido para la oxidación de películas de Mg de diferentes espesores (Aballe, 2004). Más arriba hemos descrito cómo agregados metálicos con un número determinado de átomos mostraban inusualmente alta o baja actividad química. Este efecto podría ser debido a una particularmente alta densidad de estados al nivel de Fermi para los nanoagregados más reactivos producida por el confinamiento de electrones en ellos.

Figura 4. La parte izquierda de la figura muestra los espectros de desorción térmica de CO adsorbido en películas de Cu de distinto espesor crecidas sobre un cristal de Fe. La temperatura del máximo de desorción está relacionada con la energía de ligadura de la molécula adsorbida con la superficie. Nótese que esta temperatura oscila con el espesor de la película de Cu.



4. TAMAÑOS MÁGICOS

De hecho, sabemos desde hace algún tiempo que muchos sistemas físicos (núcleos, agregados de gases nobles, etc) presentan *números "mágicos"*, de modo que estos sistemas cuando contienen cierto número de partículas son especialmente estables. Un núcleo atómico, por ejemplo, es más estable si contiene un número mágico ($N = 2, 8, 20, 28$) de protones o neutrones. Las nanopartículas metálicas también presentan tamaños "mágicos" (Duncan, 1989). Por ejemplo en materiales que cristalizan en la estructura FCC, las partículas con $N = 1, 13, 55, 147, 309$, etc., en las que la estructura forma capas cerradas de mínimo volumen, son especialmente estables. Algunas de estas partículas, como Au_{55} , que tiene un diámetro de 1.4 nm, son especialmente reactivas y tienen una corta vida media, aunque pueden ser estabilizadas adsorbiendo ligandos en su superficie. Por otro lado como el confinamiento electrónico en las nanopartículas depende tan fuertemente del tamaño, puede ocurrir que el factor dominante para determinar la configuración de mínima energía sea la interacción de los electrones de valencia con el potencial promedio dentro del nanocristalito, lo que produce números mágicos "electrónicos" adicionales.

Un modo de preparar partículas con un pequeño número de átomos es evaporando material de un disco metálico mediante un láser. Los átomos metálicos evaporados son arrastrados por un haz de He, cuyo enfriamiento produce la formación de los nanocristalitos. Cuando se examina con un espectrómetro de masa un haz de Pb se encuentra que los agregados con 7 y 10 átomos son mucho más frecuentes que los demás, lo que quiere decir que son más estables (Duncan, 1989). En el caso del Na, estos números mágicos "electrónicos" son $N = 3, 9, 20, 36$ and 61 y corresponden a completar capas electrónicas, como si de "superátomos" se tratara (Knight, 1984). En general los agregados pequeños están dominados por efectos electrónicos y los grandes, por efectos estructurales.

5. ALTURAS MÁGICAS

Recientemente se ha extendido este concepto de tamaños mágicos a "alturas mágicas" para el caso de nanoislas y películas de espesor nanométrico. Al depositar Pb sobre la superficie de un cristal de Cu a temperatura ambiente se produce el crecimiento de islas tridimensionales de Pb que son, de hecho nanopartículas cristalinas orientadas con sus

planos compactos paralelos a la superficie del sustrato. La sorpresa apareció al determinar la distribución de alturas de estas islas, encontrándose que, en lugar de la esperada distribución estadística de alturas, algunas alturas aparecían mucho más frecuentemente que otras que correspondían a una capa atómica más o menos (Otero, 2002). Por ejemplo, se observaban muchas islas con 8 capas de altura, pero ninguna con 9 capas de espesor. La existencia de alturas “mágicas” para nanoislas se debe a un efecto puramente cuántico: los electrones de valencia del Pb con energías en las proximidades del nivel de Fermi están confinados en el interior de cada nanopartícula. En efecto, los electrones de valencia del Pb no pueden escapar al vacío ya que se lo impide la barrera energética de la función de trabajo en la superficie de cada cristalito, pero tampoco pueden propagarse hacia el interior del cristal de Cu del sustrato porque no hay estados con energía y momento adecuado en él. Como resultado de este confinamiento aparecen los Estados de Pozo Cuántico que se muestran en la Figura 3. Como se ve allí, su posición y separación mutua en energía cambian al cambiar el espesor del pozo cuántico, esto es, la altura de la isla. Así pues al cambiar la altura de una nanopartícula de Pb, los estados de pozo cuántico van cruzando periódicamente el nivel de Fermi y con ellos va cambiando la energía de los electrones que los ocupan. Esta oscilación de la energía electrónica puede ser tan grande que para ciertas alturas, domine a la energía estructural, de modo que una isla prefiere tener aquellas alturas a las que *no* hay un estado de pozo cuántico cerca del nivel de Fermi. En otras palabras, las alturas mágicas corresponden a aquellas para las que la densidad de estados electrónicos en el nivel de Fermi es menor, del mismo modo que para los nanoagregados.

Con el fin de verificar directamente cómo cambia la energía total de los nanocristales de Pb al cambiar su altura se han crecido a baja temperatura películas lateralmente extensas sobre un sustrato cristalino de Cu y se ha estudiado su estabilidad térmica. A la temperatura de deposición (100 K) las películas de Pb son planas y recubren uniformemente toda la superficie del sustrato, esto es, muestran muy mayoritariamente un número preciso de capas atómicas. La Figura 4, por ejemplo, corresponde a una película de Pb de 9 capas atómicas de espesor. El panel derecho de la figura muestra que la película se descompone al calentarla a unos 200 K, desapareciendo la altura de 9 capas a favor de 8 y 10 capas atómicas. Estas alturas son más estables térmicamente que 9 capas. La figura 5 muestra la temperatura a que cada

capa de Pb de espesor diferente se vuelve inestable. Se observa que la estabilidad de las capas oscila con periodicidad de dos capas atómicas. Las oscilaciones observadas reflejan las oscilaciones en la energía total del sistema debidas a la presencia y población secuencial de los Estados de Pozo Cuántico. Estos resultados demuestran que la estabilidad estructural de las nanoestructuras puede estar controlada por efectos cuánticos, suficientemente robustos para mostrarse a temperatura ambiente, y capaces de determinar qué alturas son estables, no sólo para islas sino para películas lateralmente extensas de espesor nanométrico.

Figura 5. Imágenes STM de una película de Pb de 9 monocapas atómicas de espesor depositada a baja temperatura sobre una superficie de Cu y calentada a unos 200 K. Nótese que a esta temperatura, la película se ha descompuesto en alturas de 8 y 10 monocapas indicando la falta de estabilidad de esta altura “no mágica”.

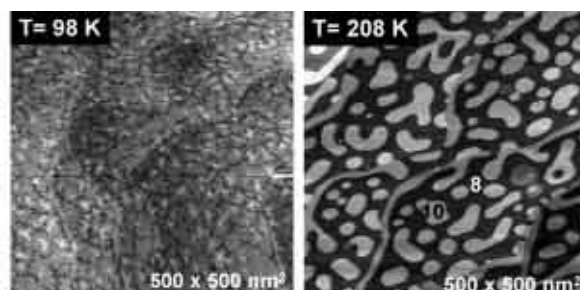
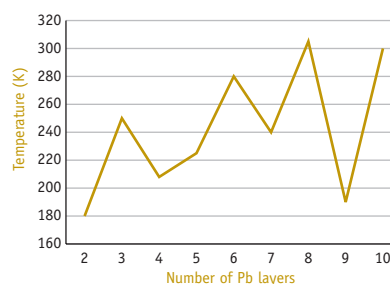


Figura 6. Temperaturas de descomposición de películas de Pb de diferente espesor crecidas a baja temperatura y en Ultra Alto Vacío sobre una superficie de Cu. Nótese cómo la estabilidad de estas películas, que es proporcional a su energía total, oscila con el espesor debido a un efecto de tamaño cuántico.



BIBLIOGRAFÍA

- ABALLE, L. *et al.* (2004) "Tuning surface reactivity via electron quantum confinement", *Phys. Rev. Lett.* 93, 196103.
- BESENBACHER, F. *et al.* (1998) "Design of a surface alloy catalyst for steam reforming", *Science*, 279, 1913.
- CALLEJA, F. *et al.* (2005) "Relationship between strain and the surface electronic structure of Cu(111) films on Ru(0001): Theory and experiment", *Phys. Rev. B* 71, 125412.
- CZOSCHKE, P. *et al.* (2003) "Quantum oscillations in the layer structure of thin metal films", *Phys. Rev. Lett.* 91, 226801.
- DANESE, A. G.; CURTI, F. G.; BARTYNSKI, R. A. (2004) "Quantum size effect induced modification of the chemisorption properties of thin films", *Phys. Rev. B* 70, 165420.
- De MIGUEL, J. J. *et al.* (1991) "Influence of the growth conditions on the magnetic properties: from monolayers to superlattices", *J. Magn. Magn. Mat.* 93, 1.
- DUNCAN, M. A.; ROUVRAY, D. H. (1989) *Scientific American* 110.
- GOODMAN, W. *et al.* (1998) *Science*, 287, 1647.
- GUO, Y. *et al.* (2004) "Superconductivity modulated by quantum size effects", *Science*, 306, 1915.
- HARUTA, M. (1997) "Size and support dependency in the catalysis of gold", *Catalysis Today*, 36, 153.
- JALOCHOWSKI, M; BAUER, E. (1988) "Quantum size and surface effects in the electrical resistivity of ultra-thin Pb films", *Phys. Rev. B* 38, 5272.
- JALOCHOWSKI, M; HOFFMAN, M.; BAUER, E. (1996) "Quantized Hall effect in ultrathin metallic films", *Phys. Rev. Lett.* 76, 4227.
- KNIGHT, W. D. *et al.* (1984) *Phys. Rev. Lett.* 52, 2141.
- LEUCHTNER, R. E. *et al.* (1989) *J. Chem. Phys.* 91, 2753.
- ORTEGA, J. E; HIMPSEL, F. J. (1992) *Phys. Rev. Lett.* 69, 844.
- OTERO, R.; VÁZQUEZ DE PARGA A. L.; MIRANDA R. (2002) "Observation of preferred heights in Pb nanoislands: a quantum size effect", *Phys. Rev. B* 66, 115401.
- OTERO, R. *et al.* (2004) "Tailoring surface electronic structure via strain to control adsorption: O/Cu/Ru(0001)", *Surface Sci.* 550, 65.
- PAGGEL, J. J. *et al.* (2002) "Atomic layer resolved quantum oscillations in the work function", *Phys. Rev. B* 66, 233403.
- WHETTEN, R. L. *et al.* (1985) *Phys. Rev. Lett.* 54, 1494.

NanoFotónica: hacia el control sub-micrométrico de la luz

Alvaro Blanco

Cefe López

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)

Antonio García-Martín

Gaspar Armelles

Instituto de Microelectrónica de Madrid (CSIC)

F.J. García Vidal

Departamento de Física Teórica de la Materia Condensada
Universidad Autónoma de Madrid.

resumen

La nanofotónica es la disciplina científico técnica que tiene por objeto el estudio de la generación, control y detección de luz en escalas similares o menores que su propia longitud de onda y el estudio de la interacción con la materia a escala nanométrica. En particular sus objetivos y retos más importantes tienen que ver con los fenómenos en que el campo de radiación electromagnética o bien la materia están confinados en tamaños del rango nanométrico. En este campo han surgido con fuerza varias áreas de investigación tendentes a explicar, predecir y aplicar dichos fenómenos y de entre ellos destacaremos los cristales fotónicos, la magneto-fotónica y la plasmónica.

palabras clave

Cristales fotónicos
Intervalo fotónico
Ópalos
Auto-ensamblado
Magneto-óptica
Plasmones

abstract

Nano-photonics is a field of research devoted to analyze the generation, control and detection of light at scales of the order of or smaller than its wavelength. Also it studies the interaction of light with matter at those scales. In particular, their goals and more important challenges have to do with phenomena in which either the radiation or the matter are confined at sub-micrometer dimensions. In this review paper, we describe three different areas of investigation which have emerged during the last ten-fifteen years: photonic crystals, magneto-photonics and plasmonics

keywords

*Photonic crystals
Magneto-optics
Plasmonics*

1. INTRODUCCIÓN

La denominada era de la información que actualmente vivimos es producto de la revolución tecnológica derivada del fuerte desarrollo de la microelectrónica en las últimas décadas. Dicho desarrollo se ha basado principalmente en el transistor como componente básico y se ha puesto de manifiesto por la miniaturización de los componentes electrónicos ya que en el espacio de tiempo de unos años hemos pasado de circuitos milimétricos a micrométricos (mil veces más pequeños que un milímetro) y a nanométricos (un millón de veces más pequeños). Este progreso ha propiciado la integración en microchips de cantidades ingentes de transistores y con ello la dificultad de disipar grandes cantidades de energía. Ésta, en forma térmica, se origina principalmente por las corrientes usadas como portadores de información entre componentes del microchip y ha estimulado la búsqueda de formas alternativas de transmisión de información. Aquí entra en juego la nanofotónica que intenta dar solución a este y otros problemas por medio del uso de la luz como portador de información. Si sustituyéramos los cables de cobre dentro de los chips por conductos fotónicos no sólo evitaríamos en buena medida la disipación térmica en los componentes pasivos del chip sino que podríamos alejar y favorecer la disipación en los componentes activos. Si a esto añadimos que las fuentes de luz pueden ser integradas en los propios chips (microláseres) y que los componentes fotónicos pueden ser dotados de funciones activas y de control (lógica fotónica) el futuro de la fotónica (electrónica asistida por fotónica) es sin duda *brillante*. Todas estas soluciones son objeto de intensa investigación hoy día y no sólo ofrecen soluciones a la electrónica, que las demanda fuertemente, sino a otros frentes tecnológicos como sensores y, un paso más allá la fotónica molecular que supone la miniaturización máxima.

De entre todos estos componentes que pueden tener su fundamento en la fotónica resaltamos tres ejemplos paradigmáticos. Los cristales fotónicos pueden ser la nueva materia prima para fabricar circuitos fotónicos. Esto incluye tanto fuentes láser de tamaño submicrométrico como canales de conducción (guías ópticas) como componentes lógicos (amplificadores, transistores fotónicos etc.). La magneto-fotónica que puede proveer herramientas de control de luz así como de detección. Y, finalmente, la plasmónica que hace uso de los metales para la alta

concentración de luz en volúmenes de dimensiones menores que la longitud de onda, para transportar luz por la superficie nano-estructurada de un metal o para ayudar a transmitir luz a través de agujeros muy pequeños en comparación con su longitud de onda.

2. CRISTALES FOTÓNICOS

Los actuales circuitos electrónicos y el procesado de información están basados en el estricto control de las propiedades de transporte de carga, de las corrientes, en el interior de estas estructuras. Entre otras cosas, dicho control depende de una propiedad fundamental de los semiconductores, como el silicio, llamado intervalo de energía prohibido (*gap*, en inglés): un rango de energías en el que los electrones ven bloqueada su propagación por el semiconductor. El control de dicho *gap* electrónico proporciona un grado de versatilidad enorme en el manejo de las corrientes electrónicas y fue el germen del que nació el elemento básico de la microelectrónica: el transistor. Desde la invención del láser, la comunicación óptica (transmisión y procesado de información por medio de impulsos de luz en lugar de impulsos eléctricos) ha progresado rápidamente. Su éxito se ha basado, por un lado, en la eficacia y rapidez de las fibras ópticas en transmitir señales (la luz viaja mucho más rápido y sin resistencia) y, por otro, gracias al desarrollo de los diferentes dispositivos que a modo de interruptores, divisores, etc. hacen que la luz pueda propagarse por circuitos ópticos de forma similar a como los electrones lo hacen por los circuitos electrónicos. Hay sin embargo una diferencia entre estas dos tecnologías: mientras las comunicaciones ópticas sólo se han hecho fuertes en la transmisión de enormes cantidades de datos a grandes distancias, la tecnología electrónica, con medio siglo de ventaja, ha sido capaz de alcanzar tal nivel de miniaturización y de eficiencia en el procesado de señales que ha provocado una revolución tecnológica a finales del siglo pasado. Sin embargo, este desarrollo descomunal tiene que hacer frente a diversos problemas que surgen cuando el grado de integración se acerca a la escala cuántica, o, simplemente, cuando el calor generado en dicha escala es difícil de disipar.

Con el afán de suplir, o aliviar, estas carencias, se ha venido proponiendo que los fotones sean usados de forma similar en vista de su mayor rapidez y menor disipación. El control

de los fotones a nivel micro o nanoscópico (en tamaños reducidos) requiere primeramente el desarrollo de materiales semiconductores de fotones, es decir, el silicio de los fotones, con propiedades similares a los electrónicos pero aplicadas a la luz: deben posibilitar el guiado de luz (a modo de cable), y deben poseer un intervalo de energías prohibido, (*gap* fotónico) similar al de los electrones (*gap* electrónico). La introducción hace casi veinte años del concepto de cristal fotónico por Eli Yablonovitch y Sajeev John apunta en esa dirección. Éstos son materiales micro y nanoestructurados con formaciones ordenadas de agujeros (o inclusiones) que podrían conducir a una revolución optoelectrónica, haciendo con luz lo que los semiconductores hacen con electrones.

En esencia, un cristal fotónico es un material compuesto por múltiples elementos periódicamente distribuidos que dispersan la luz de una manera coherente y conjunta, cooperativa. Este hecho produce, de manera similar a lo que ocurre con los electrones en los semiconductores, un rango de energías prohibido para la propagación de los fotones, en este caso, un *gap* fotónico. Mediante la combinación y estructuración de estos elementos es posible diseñar circuitos fotónicos similares a los electrónicos, con sus cables, interruptores, divisores, etc. Estamos pues ante unos materiales con los que, en un futuro cercano, se pueden microchips para la luz.

Los parámetros que definen un cristal fotónico (y de los que dependen sus propiedades) son principalmente cuatro: *Simetría*, o en qué forma están distribuidos los elementos dispersores, *Contraste Dieléctrico*, que es la relación de índices de refracción de los materiales que forman el cristal (en el caso de agujeros, su índice de refracción sería 1 en el aire y n en el material), *Factor de Llenado*, o relación de volúmenes entre el material y los agujeros y finalmente el *parámetro de red*, o periodo, que nos fijará el rango energético donde operaciones situará el *gap*.

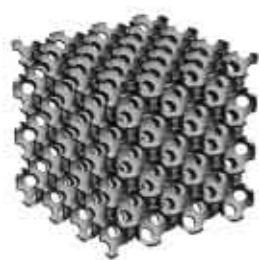
El primer cristal fotónico que funcionó se hizo partiendo de un bloque de material cerámico en el que se practicaron tres conjuntos de agujeros. En cada grupo los agujeros eran paralelos entre sí y formando 35 grados de inclinación con la vertical. El material así fabricado se ha denominado Yablonovita en honor a su inventor. En dicho diseño los agujeros eran de seis milímetros de diámetro y su

distribución periódica cortaba ondas de radio de entre 13 y 16 gigahertzios.

En algo menos de 20 años se ha reducido la escala hasta el rango óptico (longitudes de onda inferiores a la micra) y se han desarrollado algunas aplicaciones basadas en la fabricación de circuitos fotónicos. En éstos la luz es guiada por conductos rodeados de cristal fotónico que impide que la luz se escape ya que se comportan como un material opaco. Asimismo se han fabricado nuevas fibras ópticas, cuya envoltura está constituida por un cristal fotónico, que presentan espectaculares prestaciones y han permitido, por ejemplo, fabricar fuentes de luz de amplio espectro por generación de supercontinuo. La imposibilidad de propagación fue inicialmente propuesta para anular la emisión espontánea (principal fuente de pérdidas en numerosos dispositivos electrónicos y optoelectrónicos) y para localizar luz (y almacenar información). Aunque la aplicación directa de esta idea ha permitido la fabricación de láseres de bajo umbral, este concepto ha dado lugar a nuevas expectativas e interesantes aplicaciones tanto tecnológicas como fundamentales. La microestructura de los cristales fotónicos que produce selectividad en la propagación de distintas longitudes de onda en distintas direcciones se traduce en irisaciones. Este mecanismo se puede explotar para obtener color estructural sin necesidad de pigmentos que, en numerosos casos, son costosos productos tóxicos.

Los métodos de fabricación propuestos y usados han sido tan diversos como la imaginación puede crear pero podemos hacer una clasificación simple entre lo que llamaremos "*de arriba abajo*" (*top down*) y "*de abajo arriba*" (*bottom up*). Los primeros se basan en el procesado por métodos fotolitográficos prestados de tecnologías maduras, a menudo costosos y tecnológicamente complejos. Otras técnicas incluyen la litografía holográfica, o la prometedora escritura directa por láser. Ésta se basa en la polimerización, por absorción de dos fotones, de una resina fotosensible en que se *dibuja* por medio de un láser, a modo de pincel. Posteriormente se *revelan* y extraen las estructuras por disolución de la parte no expuesta. Los segundos, también llamados de auto-ensamblado, están basados en la tendencia natural de ciertos sistemas (moléculas, virus, micropartículas, etc.) a auto-ordenarse. La naturaleza provee numerosos ejemplos como los ópalos, las plumas de los pavos reales o los colores de las alas de ciertas mariposas.

Figura 1. Ópalo inverso obtenido tras infiltrar un ópalo artificial, formado al ordenar esferas submicrométricas, con un material y disolver la matriz inicial. El método permite fácilmente ensamblar grandes cantidades de material comparado con los métodos de arriba abajo. La posibilidad de posterior infiltración con otros materiales potencia sus posibilidades



Uno de los métodos de *abajo arriba* de mayor uso es el ensamblado de ópalos artificiales. Se trata de empaquetamientos compactos de esferas (habitualmente de sílice o de polímero) que se fabrican por sedimentación natural de una suspensión coloidal de dichas nanoesferas. Estos sistemas se han revelado extraordinariamente útiles por su gran versatilidad para ser usados como armazones de arquitecturas más complejas. De hecho la infiltración de estas estructuras con materiales como el silicio dio lugar al primer cristal 3D con un intervalo fotónico completo a la longitud de onda de las comunicaciones ópticas (1.5 μm). Estos métodos pueden ser combinados con otras técnicas como la escritura directa por láser para definir estructuras (guías, circuitos, etc) en el interior del material.

Los métodos de *arriba abajo* destacan por su versatilidad, la cual ocurre a expensas de una complejidad experimental y coste económico elevado, pero que sin embargo los dota de una potencia extraordinaria para producir tanto sistemas 2D como 3D por medio de lo que se conoce como fabricación *capa a capa*. Ésta comienza por la definición litográfica de motivos que son fijados por método químicos o físicos en obleas de semiconductor. En un segundo paso se rellenan los huecos y planariza el conjunto con un material de sacrificio para depositar una nueva capa de semiconductor y se repite el proceso. Finalmente, se disuelve el material sacrificial para obtener la estructura final. Como la definición se hace capa a capa se puede incluir cualquier motivo en su interior como guías de onda, resonadores, fuentes de luz, detectores, etc. que quedan enterrados al continuar el crecimiento del resto de la estructura.

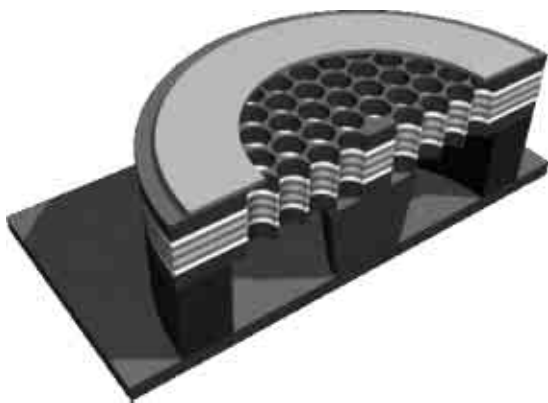
Un buen ejemplo de este tipo es la fabricación de cristales fotónicos 3D combinando capas de barras y capas de agujeros. El proceso consiste en la definición y vaciado litográfico de una red 2D hexagonal de agujeros en silicio que se rellenan con sílice para, a continuación cubrirlos de nuevo con una capa de silicio. Aquí se inicia de nuevo el proceso realizando esta vez los agujeros desplazados en relación con la capa anterior. Si se hacen más profundos que el espesor de la capa depositada los agujeros alcanzarán, en parte, la capa anterior (donde ya hay agujeros rellenos de sílice) de modo que en ciertas subcapas los agujeros solapan dejando en rodeando lo que serán columnas. Así se definen capas de agujeros y de columnas que, tras el vaciado de toda la sílice, simulan los enlaces atómicos del diamante: tres brazos en un plano y el cuarto definido por una columna en su intersección. La virtud de este método es que en sólo cuatro procesos litográficos se consiguen siete capas activas.

Un ejemplo prominente de aplicación de los cristales fotónicos es la fabricación de un láser basado en la inhibición de emisión espontánea por medio de un *gap* fotónico. En este caso, y como material base, se usa un pozo cuántico múltiple como fuente de emisión pero se combina con un cristal fotónico formando una red de agujeros de tamaño nanométrico vaciados litográficamente. A diferencia de un láser ordinario de estado sólido, en éste la emisión ocurre en una zona muy reducida - definida por la ausencia de unos pocos agujeros que constituyen una microcavidad dentro del cristal fotónico- y que incrementan fuertemente la eficiencia del laser. Todo el dispositivo (ver Figura 3) no ocupa más que unas micras y se puede hacer funcional con corrientes de alimentación de algunos microamperios.

Figura 2. Cristal fotónico 3D fabricado capa a capa por litografía. Las capas compuestas por agujeros (menores de una micra en diámetro) separados por brazos en estrella y las capas compuestas por columnas se alternan simulando los enlaces químicos de una red de diamante



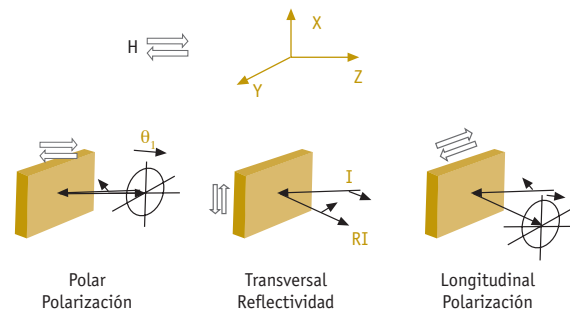
Figura 3. Esquema de láser basado en cristal fotónico 2D. La falta un agujero constituye una microcavidad (menos de una micra de tamaño) donde se concentra el campo electromagnético. El material de que está constituido el cristal fotónico es un pozo cuántico múltiple (multicapa semiconductor) que por sí solo constituiría in diodo emisor de luz (LED). El pilar central en la base sirve como electrodo posterior mientras que el anillo dorado en la cara superior es el electrodo frontal. El cristal fotónico impide que la emisión salga por los laterales del dispositivo y hace que se canalicé verticalmente desde la cavidad central



3. MAGNETO NANOFOTÓNICA

En 1845 Michael Faraday descubrió que un vidrio podía adquirir actividad óptica al aplicar un campo magnético. Faraday observó que plano de polarización de la luz giraba cuando se aplicaba un campo magnético paralelo a la dirección de propagación de la luz. Treinta y dos años después John Kerr también observó un efecto similar en la luz reflejada por la pieza polar de un electroimán, pieza que era de metal ferromagnético. Ambos efectos, conocidos en la actualidad como Efecto Faraday y Efecto Kerr, son las dos caras de un mismo fenómeno relacionado con la modificación que sufren las propiedades ópticas de los materiales al aplicar un campo magnético. Esta modificación se manifiesta de diferentes formas dependiendo de la orientación relativa del campo magnético aplicado, dirección de propagación y polarización de la luz. Por ejemplo, en la figura 4 vemos tres casos que ilustran los cambios que se pueden producir en la luz reflejada por un material magneto-óptico.

Figura 4. Diferentes configuraciones de aplicación del campo magnético y las propiedades ópticas que se modifican



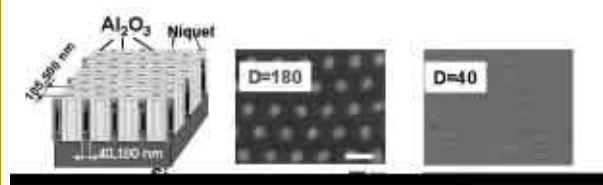
La posibilidad de controlar las propiedades de transmisión de la luz aplicando un campo magnético ha abierto las puertas al desarrollo de diversos tipos de dispositivos fotónicos activos, es decir dispositivos controlados por un agente externo, cuya función depende de cómo se aplique el campo magnético. En la actualidad existen diferentes materiales con efecto magneto-óptico apreciable a campos magnéticos bajos, y que ya se están utilizando en diversas aplicaciones tales como el almacenamiento de información o el control de las comunicaciones ópticas. Así, para aplicaciones de almacenamiento de información (discos magneto-ópticos), se utilizan metales o aleaciones metálicas ferromagnéticas. En estos discos hay zonas (de unos cientos de nanómetros de tamaño) que se encuentran imanadas perpendicularmente a la superficie y en direcciones opuestas (hacia arriba o hacia abajo) constituyendo los bits de información. Dependiendo de la orientación de la imanación en la zona, la luz reflejada tendrá su plano de polarización girado en uno u otro sentido, lo que permite leer la información del disco. Por otra parte, en las aplicaciones relacionadas con las comunicaciones ópticas (dispositivos ópticos integrados tales como los aisladores y moduladores) se utilizan materiales transparentes. Para estas aplicaciones los materiales más utilizados hasta la fecha han sido los granates. Hay diversos tipos de granates y, si bien todos ellos son transparentes en la zona del infrarrojo, presentan absorción óptica en la zona del visible. Esto hace necesario el desarrollo de nuevos materiales que presenten propiedades ópticas y magneto-ópticas adecuadas en el rango de longitudes de onda requerido. Muy recientemente se han empezado a desarrollar materiales formados por nanopartículas de metales ferromagnéticos embebidos en matrices transparentes. Estos

materiales presentan efectos magneto-ópticos elevados y una absorción óptica aceptable en la zona del visible.

Existen diversas formas de obtener estos materiales, por ejemplo, partiendo de una lámina de aluminio mediante un proceso de anodización electroquímica se puede obtener una lámina de alúmina porosa (óxido de aluminio con poros en su interior). El tamaño de los poros de la capa de alúmina se puede controlar y varía entre 30 y 180nm y la distancia entre ellos es de unos cientos de nanómetros. Mediante un adecuado control de las condiciones de elaboración o empleando láminas pre-tratadas se puede conseguir capas de alúmina porosa donde los poros presentan un ordenamiento hexagonal perfecto. Estos agujeros se pueden rellenar con otros materiales como por ejemplo un metal ferromagnético, lo que da lugar a que la capa así obtenida tenga propiedades magneto-ópticas inducidas por el metal ferromagnético que rellena los poros. El control del tamaño de los poros y las distancias entre ellos permite la obtención de materiales con propiedades magneto-ópticas diferentes, las cuales pueden ser superiores a los materiales masivos de partida.

En la figura 5 se muestra un esquema de estas nanoestructuras formadas por hilos de níquel en un entorno de alúmina. A pesar de que la cantidad de Ni en las muestras es de sólo el 18% en lugar de obtener una rotación Kerr 5 veces menor, por la reducción de la cantidad de material magneto-óptico, si los hilos tienen un diámetro de 40 nm los valores de rotación Kerr que se obtienen en el visible son equivalentes e incluso superiores a los del Ni masivo.

Figura 5. Esquema de una nanoestructura de hilos de níquel en alúmina, junto con micrografías de dos nanoestructuras con la misma densidad de hilos de níquel (18%) pero con tamaños de hilos diferentes. Hilos de níquel de 180 nm separados por 500 nm e hilos de 40 nm separados 105 nm respectivamente



Pero la nanoestructuración no sólo permite conseguir aumentar los efectos existentes en los materiales

macroscópicos, además permite manipular la respuesta. Por ejemplo, si en lugar de utilizar hilos de 40nm de diámetro utilizamos hilos de 180nm de diámetro la rotación Kerr en el visible disminuye radicalmente y aumenta en la zona del infrarrojo. Esto es extremadamente útil, ya que permite el diseño de materiales prácticamente a la carta, con propiedades ópticas y magneto-ópticas adecuadas en el rango de energía deseados. Así mismo, se puede diseñar el material de forma que las interacciones magnéticas entre los componentes del material permitan que los efectos sean claramente visibles a campos magnéticos suficientemente bajos, de tal manera que el dispositivo sea lo más compacto posible y permita fácilmente su integración.

Las nanoestructuras que hemos presentados en el ejemplo anterior son fundamentalmente dieléctricas. No obstante para muchas aplicaciones en nanofotónica se requiere la utilización de materiales metálicos para propagar la luz (óptica de plasmones). En este caso la utilización de metales que tengan propiedades ópticas que se puedan modificar por un campo externo, por ejemplo un campo magnético, puede permitir desarrollar nuevos dispositivos para el control y manipulación de la luz. Estos materiales se pueden fabricar introduciendo nanopartículas de metales ferromagnéticos en matrices de metales nobles. El material así obtenido tiene propiedades magneto-ópticas, inducidas por las nanopartículas ferromagnéticas, y propiedades ópticas parecidas a los metales nobles, en particular presentan resonancias de plasmon no amortiguadas. Existen diversas posibilidades para fabricar estas nanoestructuras: una forma es generar por métodos químicos capas de nanopartículas tipo cebolla cuyo núcleo es un metal ferromagnético y cuya envoltura es un metal noble, otra es mediante técnicas de deposición de capas delgadas. En estos sistemas los átomos del metal ferromagnético, que proceden de un blanco o fuente, se depositan sobre un sustrato en cuya superficie hay depositada una fina lámina de metal noble. Los átomos de metal ferromagnético se agregan en la superficie para formar nanopartículas. El tamaño de las mismas y su concentración se pueden variar modificando las condiciones de deposición (temperatura del sustrato y cantidad de material depositado). Posteriormente a la deposición del metal ferromagnético se deposita una capa de metal noble, quedando las partículas embebidas en la matriz de metal noble. Las capas así obtenidas se pueden utilizar para diversos dispositivos y en particular para biosensores de resonancia de plasmón. En este campo se han desarrollado ya los primeros prototipos de

biosensores magneto-ópticos, que muestran sensibilidades cinco veces superiores a los biosensores ópticos convencionales. Mediante un adecuado diseño de los materiales se espera que esta sensibilidad pueda llegar a ser 50 veces superior a la de los biosensores actuales.

Figura 6. Ejemplo de estructuras complejas de metal noble combinadas con material magneto-óptico



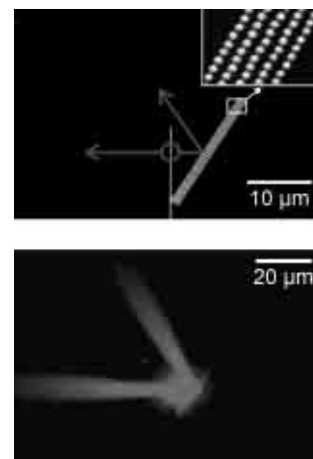
4. PLASMÓNICA

La superficie de un metal está *decorada* por lo que se conocen como *plasmones superficiales*. Estos son básicamente modos electromagnéticos que se propagan por la superficie de un metal y que se originan en el proceso de interacción de luz con los electrones libres del material. Una característica importante es que estos modos permiten la alta concentración de luz en las superficies metálicas en volúmenes de dimensiones mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente. Esta propiedad ha permitido el uso de nanoestructuras metálicas desde hace unos veinte años como sensores químicos basados en el fenómeno conocido como *Surface Enhanced Raman Scattering (SERS)*. Menos utilizada ha sido la propiedad de los plasmones de *transportar* luz de un punto a otro de una superficie metálica. La razón radica en que en ese proceso de transporte parte de la luz es absorbida por el metal. En metales con poca absorción en el rango visible como el oro o la plata, la longitud típica de propagación es del orden de 100 micras (para distancias mayores que este valor, la intensidad de la luz ha decaído a un valor más pequeño que $1/e$ del valor inicial). Este valor para la longitud de propagación es demasiado pequeño si estamos pensando en llevar luz de un punto a otro a través de grandes distancias mediante un cable metálico pero resulta suficientemente grande si pretendemos construir circuitos ópticos de dimensiones de unas pocas micras. Por otro lado, el hecho de que en un metal se pueda transportar al mismo tiempo luz (en forma de plasmones superficiales) y corriente eléctrica hace que este tipo de materiales sean muy prometedores. Es por ello que el interés por las propiedades de transporte de los plasmones de superficie ha crecido

enormemente en los últimos diez años y de hecho podemos decir que ha surgido una nueva rama de investigación dentro de la Óptica que ya se conoce como **Plasmónica**. El objetivo último de esta rama de investigación sería poder hacer óptica en dos dimensiones: poder llevar luz de un punto a otro en la superficie de un metal utilizando para ello dispositivos ópticos análogos a las lentes, espejos, etc... que se utilizan en Óptica tradicional o incluso construir circuitos fotónicos basados en las propiedades de transporte de los plasmones superficiales.

En la figura 7 mostramos un ejemplo de espejo para plasmones realizado por el grupo experimental que dirige Joachim Krenn en la Universidad de Graz (4). Este espejo consiste básicamente en 5 hileras de esferas de oro de dimensiones nanométricas dispuestas periódicamente sobre una superficie de oro. Las distancias entre esferas y entre hileras están elegidas de tal forma que un plasmón de una longitud de onda determinada es reflejado totalmente cuando incide sobre este sistema.

Figura 7. Conjunto periódico de nano-estructuras metálicas que actúa como espejo para un plasmon superficial que viene por la izquierda de la imagen



Como ya se mencionó anteriormente el gran cuello de botella para transportar luz de un punto a otro en escalas pequeñas es poder cambiar la dirección de la propagación de la luz. Una de las estrategias más exitosas en este empeño ha sido crear guías de ondas rodeadas de cristales fotónicos metálicos bi-dimensionales (básicamente conjuntos periódicos de protuberancias metálicas). Como en el caso de los cristales

fonónicos dieléctricos, el periodo de estas estructuras es elegido de tal forma que la propagación de un plasmón dentro de este sistema esté prohibida (en términos más precisos, que la longitud de onda del plasmón esté dentro del *gap* fotónico del cristal fotónico metálico). De esta forma la luz en forma de plasmón se propagará dentro de la guía de onda construida y no por el resto de la superficie. Un ejemplo de *embrión* de circuito plasmónico basado en este tipo de ideas se muestra en la figura 8 y corresponde a un *Y-splitter* creado por el grupo experimental que dirige Sergey Bozhevolnyi en Aalborg (Dinamarca) (5). Sin embargo, el problema de todos estos dispositivos basados en la existencia de *gap* fotónico en la estructura periódica metálica es que parte de la intensidad de luz que se transporta se pierde durante el proceso no tanto por absorción por el metal sino por radiación al aire haciendo que la longitud efectiva de propagación de los plasmones en este tipo de circuitos sea de unas pocas micras en lugar del valor de 100 micras cuando el plasmón se propaga por una superficie de metal que no presentan nano-estructuración. Quizás la mejor forma de utilizar los plasmones superficiales para transportar luz a través de una superficie metálica sea horadando canales en forma de V (*V-grooves*) de tal forma que se puedan excitar los llamados *channel plasmon polaritons* (un tipo especial de plasmones superficiales que presentan alto confinamiento electromagnético y largas longitudes de propagación). Recientemente se ha demostrado que estos modos electromagnéticos pueden tener longitudes de propagación de hasta 100 micras (6).

Aparte de las propiedades antes mencionadas de los plasmones superficiales de almacenar luz en volúmenes muy pequeños y de transportar luz a lo largo de una superficie metálica, desde el año 1998 se sabe que los plasmones superficiales sirven también para transmitir luz a través de agujeros de dimensiones más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente. En un artículo seminal aparecido en *Nature* (7), el grupo experimental de Thomas Ebbesen en Princeton (USA) demostró que la transmisión de luz a través de agujeros muy pequeños en comparación con la longitud de onda de la luz podía aumentar en varios órdenes de magnitud si éstos agujeros estaban dispuestos de forma periódica sobre una superficie de oro o plata. Este fenómeno era resonante y aparecía para un valor concreto de la longitud de onda de la luz incidente. Ya en ese artículo se sugirió que los plasmones superficiales eran los responsables de este fenómeno de transmisión extraordinaria. Esta visión se ha visto

corroborada por diversos estudios teóricos llevados a cabo por diferentes grupos de investigación durante los últimos años. Aparte de su interés desde el punto de vista fundamental, se han sugerido diversas aplicaciones prácticas del fenómeno: desde la nano-litografía al desarrollo de pantallas, pasando por el diseño de bio-sensores o de dispositivos activos (puertas ópticas) introduciendo en este tipo de estructuras materiales no-lineales.

El análisis teórico de este fenómeno de transmisión extraordinaria demostró que el ingrediente fundamental para observarlo era la periodicidad de la estructura que permitía el acoplo de la luz incidente con los plasmones superficiales. Por tanto, se sugirió que un **único** agujero rodeado de una estructura periódica de *trincheras* (véase panel (a) en Figura 9) podría dar lugar al mismo fenómeno. Esta hipótesis teórica se verificó experimentalmente en 2002 (8). En este mismo trabajo se demostró también que si esta corrugación se creaba también rodeando a la superficie de salida del agujero, la luz en vez de emerger difractada en todas direcciones como ocurre cuando el agujero tiene dimensiones menores que la longitud de onda aparecía fuertemente colimada, como se puede observar en el panel (b) de la Figura 9.

Figura 8. Guía de ondas en forma de Y-splitter creada en un cristal fotónico metálico formado por una red hexagonal de protuberancias de oro depositadas sobre una superficie del mismo material (panel de arriba). En el panel de en medio se muestra una imagen obtenida mediante AFM de la estructura mientras que en el panel inferior se visualiza mediante SNOM la propagación de un plasmón superficial por la guía de ondas.

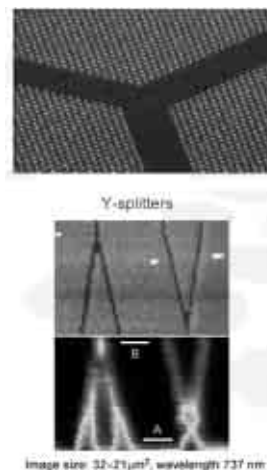
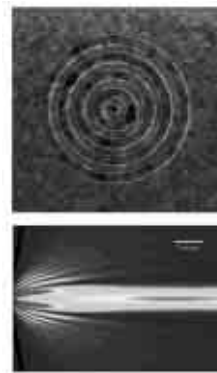


Figura 9. En el panel de arriba se muestra la estructura conocida como ojo de buey: agujero central (en este caso su diámetro es de 90 nm) rodeado de trincheras periódicas concéntricas separadas 500nm y de anchura igual a 250nm. En el panel de abajo se muestra una simulación teórica del fenómeno de colimación de la luz cuando la superficie de salida que rodea al agujero central presenta también una corrugación en forma de ojo de buey.



Todos estos resultados muestran el potencial que tienen los plasmones superficiales para almacenar luz en volúmenes pequeños, de transportar luz de un punto a otro dentro de una superficie metálica o de ayudar a aumentar enormemente la intensidad de luz transmitida a través de un agujero de dimensiones menores que la longitud de onda. Actualmente

hay un número enorme de grupos que están investigando desde el punto fundamental este tipo de estructuras y durante los últimos dos años han surgido grupos que están analizando las posibilidades prácticas de utilización de los plasmones superficiales en diversos dispositivos ópticos.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) LÓPEZ, C. (2003) "Materials aspects of photonic crystals", *Advanced Materials*, 15, 1679.
- (2) MELLE, S.; MENÉNDEZ, J. L. ; ARMELLES, G. ; NAVAS, D. ; VÁZQUEZ, M. ; NIELSCH, K. ; WEHRSPHON, R. B.; GÖSELE, U. (2003) "Magneto-optical properties of nickel nanowire gratings", *Appl. Phys. Lett.* 83, 4547.
- (3) GARCÍA-MARTIN, A.; ARMELLES, G.; PEREIRA, S. (2005) "Light transport in photonic crystals composed of magneto-optically active materials", *Phys Rev. B* 86, 205116.
- (4) DITLBACHER, H.; KRENN, J. R.; SCHIDER, G.; LEITNER, A.; AUSSENEK, F. R. (2002) *Applied Physics Letters* 81, 1762.
- (5) BOZHEVOLNYI, S. I. *et al.* (2001) *Applied Physics Letters* 79,1076.
- (6) BOZHEVOLNYI, S. I. ; VOLKOV, V. S. ; DEVAUX, E. ; EBBESEN, T. W. (2005) *Physical Review Letters* 95, 046802.
- (7) EBBESEN, T. W. *et al.*, (1998) *Nature* 391, 667.
- (8) LEZEC, H. J.; DEGIRON, A.; DEVAUX, E.; LINKE, R. A. ; MARTIN-MORENO, L.; GARCÍA-VIDAL, F. J.; EBBESEN, T. W. (2002) *Science* 297, 820.

Nanomagnetismo

A. Hernando

Instituto de Magnetismo Aplicado (RENFE-UCM-CSIC)
P.O. Box 155, 28230 Las Rozas, Madrid, Spain.

Autor de contacto: ahernando@adif.es

J. M. González

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid
CSIC, c/Sor Juana Inés de la Cruz s/n, 28049 Madrid, Spain.

M. A. García**P. Marín****P. Crespo**

Instituto de Magnetismo Aplicado (RENFE-UCM-CSIC)
P.O. Box 155, 28230 Las Rozas, Madrid, Spain.
Depto. Física de Materiales
UCM, 28040 Madrid, Spain.

resumen

En este trabajo se revisan las propiedades magnéticas de los materiales nanoestructurados y más en concreto de las nanopartículas. Se describe cómo los materiales magnéticos cambian notablemente sus propiedades cuando su tamaño se reduce a unos pocos nanómetros. Además, debido a estos efectos de tamaño, algunos materiales que no son ferromagnéticos en estado masivo pasan a tener un comportamiento típico de materiales ferromagnéticos cuando se encuentran en forma de nanopartículas. Finalmente, se muestran algunas de las aplicaciones de las nanopartículas magnéticas en el campo de la biomedicina.

palabras clave

Nanomagnetismo
Nanopartículas
Efectos de tamaño

abstract

This is a revision of the nanostructured materials' magnetic properties, and, particularly, of the nanoparticles. Huge changes in the magnetic materials' properties arise when its size is reduced to a few nanometers. Also, due to this size effects, some non-ferromagnetic materials in massive state adopt a ferromagnetic behavior when are reduced to the nanoparticles state. Finally, some applications of the magnetic nanoparticles in biomedicine are showed.

keywords

Nanomagnetism
Nanoparticles
Size effects

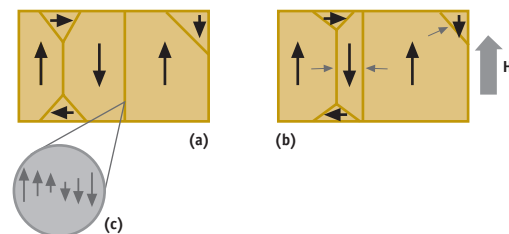
En 1959, Richard Feynman pronunciaba una conferencia en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física titulada “*There’s plenty of room at the bottom*” (*Hay mucho sitio ahí abajo*) [1] en la cual llamaba a los físicos de todas las especialidades a entrar en un nuevo campo de la física: el estudio de las propiedades de los materiales de unos pocos nanómetros de tamaño (un nanómetro es la millonésima parte del milímetro). Decía Feynman en su conferencia que a esta escala descubriríamos cosas sorprendentes; los sistemas de este tamaño no tendrían las mismas propiedades que los materiales con la misma composición mucho más grandes, sino que éstas se verían alteradas por los fenómenos de escala. Esta conferencia se considera el nacimiento de la nanociencia y nanotecnología. En aquella época no existían las herramientas necesarias para fabricar, manipular y estudiar estos sistemas nanométricos, pero hoy en día sí es posible hacerlo, y en los últimos años estamos asistiendo a la confirmación de todo aquello que Feynman predijo hace ya casi 50 años.

Efectivamente, si tomamos un elemento de material masivo (de unos milímetros, observable a simple vista) y reducimos su tamaño progresivamente, llega un momento en que sus propiedades físicas (eléctricas, ópticas, magnéticas, mecánicas, etc) empiezan a cambiar drásticamente. Curiosamente, estos fenómenos ocurren cuando reducimos el tamaño del sistema al orden de unos nanómetros con independencia de su composición. Así, si miramos un cubo de oro de 1 cm de lado lo vemos de color amarillo. Si lo cortamos ahora hasta obtener uno de la mitad de tamaño, sigue siendo amarillo. Podríamos repetir la operación muchas veces y el oro seguiría siendo amarillo, pero cuando hiciéramos el cubo tan pequeño que midiera tan solo unos pocos nanómetros pasaríamos a verlo de color rojo. Algo similar ocurre con las propiedades eléctricas. Si tomamos un cubo de cobre, que es un material conductor de la electricidad, y lo vamos cortando en trozos más pequeños, sigue siendo conductor hasta que llegamos a un cubo de unos pocos nanómetros, que pasa a ser aislante. Análogamente, los materiales magnéticos también cambian sus propiedades cuando se hacen pequeños y llegan a la escala del nanómetro.

¿Porque son distintas las cosas a escala nanométrica? Podemos indicar dos razones fundamentales: El hecho de que las longitudes características de muchos fenómenos físicos son precisamente de unos pocos nanómetros y la importancia que adquiere la superficie a esta escala. Vemos algunos ejemplos de cómo estos efectos alteran las propiedades magnéticas de los materiales en la nanoescala.

Los materiales ferromagnéticos están formados por “dominios” zonas donde la imanación es uniforme como muestra la figura 1a. Resulta muy difícil (esto es, requiere mucha energía) mantener dos átomos juntos de un material ferromagnético con el momento magnético antiparalelo. Por ello, la separación entre dominios no es abrupta, sino que está formada por las llamadas *paredes de dominio*, que son zonas en las que la imanación va girando progresivamente (figura 1b). El espesor de estas paredes de dominio es típicamente de unos pocos nanómetros. Cuando aplicamos un campo magnético lo suficientemente intenso en una dirección, la imanación se orienta paralela al campo magnético en todas las zonas del material. Uno de los mecanismos que requiere menos energía para invertir el sentido de la imanación es el movimiento de las paredes de dominio, que hace crecer unos dominios (los que estaban ya orientados paralelos al campo) y disminuir otros como ilustra la figura 1c. Pero en una partícula de unos pocos nanómetros, no caben las paredes de dominio, por lo que no existen, y por tanto, no pueden desplazarse con lo que resulta más difícil invertir la imanación. Esto conlleva que la imanación sea más estable y resulta más difícil invertirla.

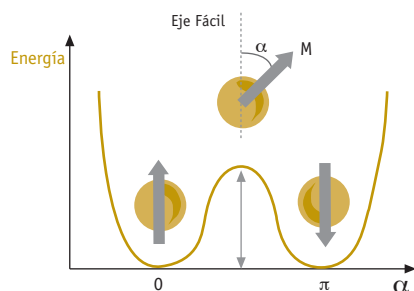
Figura 1. (a) Estructura de dominios de un material. El detalle ilustra la orientación de los momentos magnéticos en una pared de dominio. (b) Al aplicar un campo magnético, las paredes de dominio se desplazan aumentando de tamaño aquellas que estaban orientadas paralelas al campo magnético previamente



Otro fenómeno que afecta a las propiedades de los materiales magnéticos a escala nanométrica es el *superparamagnetismo*, que constituye uno de los problemas tecnológicos más importantes en la actualidad. Los materiales ferromagnéticos son la base de los muchos dispositivos de almacenamiento de información permanente en discos duros y memorias. Estos materiales tienen una dirección preferente, en la cual se puede orientar la imanación de manera estable. Existen por tanto dos

posibles orientaciones que corresponden a los dos sentidos, como se muestra en la figura 2, a los que se puede asignar los valores 1 y 0, y utilizarlos de esta manera para almacenar información en formato binario. La estabilidad de la imanación se debe a que para invertirla es necesario superar una barrera de energía cuyo valor es $K \cdot V$, siendo K la constante de anisotropía del material y V el volumen de la partícula (figura 2). Lógicamente cuanto menor sea el volumen de la partícula, menor será esta barrera de energía y resultará más fácil que la imanación se invierta de manera espontánea debido a las fluctuaciones térmicas, que son del orden de $K_B \cdot T$ (K_B constante de Boltzman, y T la temperatura del material) y por tanto independientes del volumen. Consideremos una partícula de cobalto de 100 nanómetros de radio; si la imanamos en una dirección y luego retiramos el campo magnético, el tiempo medio en el que se espera que la imanación se invierta espontáneamente a temperatura ambiente es de miles de años, pero si la partícula tiene 3 nm de radio ese tiempo pasa a ser ...una hora !! El superparamagnetismo tiene una influencia muy importante en el desarrollo de nuevos dispositivos tecnológicos con memorias magnéticas. Actualmente, se fabrican cada vez ordenadores más potentes, que manejan mayor cantidad de información y se necesitan por tanto dispositivos capaces de almacenar información con una densidad cada vez mayor. Según la ley de Moore [2], cada 6 meses se duplica la densidad de información que deben almacenar los dispositivos informáticos. Esto significa que el tamaño de los bits se debe hacer cada vez más pequeño. Estamos llegando a un tamaño en el que los bits no se pueden reducir ya que en ese caso, la imanación se invertiría aleatoriamente debido a las fluctuaciones térmicas en tiempos de unos pocos días, perdiéndose la información.

Figura 2. Ilustración de los niveles de energía de una nanopartícula con un eje fácil de imanación, en función de la orientación del momento magnético respecto al mismo (ángulo α)

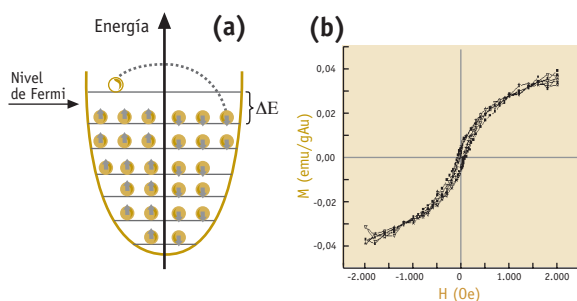


Si bien en general todas las propiedades físicas se alteran cuando el tamaño se encuentra en la escala del nanómetro, las propiedades magnéticas resultan especialmente sensibles a estos efectos de tamaño. Los procesos físicos que condicionan las propiedades de un material están asociadas a energías del orden del electronvoltio: en un semiconductor, el paso de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción (esto es, el paso de comportamiento aislante a comportamiento conductor de la electricidad) es típicamente de entre 1 y 3 eV; en cuanto a las propiedades ópticas, cabe señalar que la absorción o emisión de un fotón de luz visible o infrarrojo próximo es del mismo orden. También la energía de creación de un defecto puntual (que condicionan en gran medida las propiedades físicas de los materiales, entre ellas las propiedades mecánicas) es del orden del electronvoltio. Pero las diferencias de energía entre las dos posibles orientaciones del momento magnético de un electrón (que son las responsables del orden magnético) son de unos pocos milielectronvoltios. Por ello, basta una pequeña alteración de la estructura del material que conlleve variaciones del orden del milielectronvoltios en los niveles de energía para que las propiedades del material cambien drásticamente. Consecuentemente, la nanoescala no solo produce cambios cuantitativos en el comportamiento magnético de los materiales (campo coercitivo, tiempos de relajación, etc.) sino también cualitativos como confirman los recientes descubrimientos de que algunos materiales paramagnéticos o diamagnéticos en estado masivo pueden pasar a mostrar un comportamiento ferromagnético a escala nanométrica.

Consideremos el caso del Paladio (Pd). Se trata de un material "casi ferromagnético" ¿Qué significa esto? En un metal los electrones de conducción están ocupando los estados de menor energía hasta un cierto nivel que recibe el nombre de Nivel de Fermi como muestra la figura 3a. En principio hay el mismo número de electrones con el espín "hacia arriba" que con espín "hacia abajo" (las dos sub-bandas están igualmente pobladas) por lo que el momento magnético neto es cero. Si un electrón quiere cambiar su "espín" tiene que pasar de una sub-banda a otra. Este cambio disminuiría su energía magnética ya que pasaría a ver más electrones con el espín paralelo que antiparalelo; pero su energía cinética aumentaría puesto que, para cambiar su espín, el electrón tiene que irse a un estado libre de la otra sub-banda (el principio de exclusión prohíbe que dos electrones ocupen el mismo estado con el mismo espín). Si la disminución de energía magnética es mayor que el aumento de energía cinética, este cambio de espín se producirá

de manera espontánea, y el material tendrá un momento magnético permanente, esto es, comportamiento ferromagnético (este es el llamado “criterio de Stoner” para el ferromagnetismo). Esta situación podrá darse cuando la separación de niveles energéticos (cerca del nivel de Fermi) sea muy pequeña, o lo que es lo mismo, cuando el material tenga una *densidad de estados* muy elevada en el nivel de Fermi: en este caso, el aumento de energía cinética cuando el electrón cambia su espín es muy pequeña y puede verse compensada por la disminución de energía magnética. En el Pd masivo, la densidad de estados en el nivel de Fermi no es lo suficientemente alta como para satisfacer el criterio de Stoner, pero esta muy próxima al valor límite. Sin embargo, en una nanopartícula la densidad de estados es diferente al estado masivo por lo que dicho criterio podría llegar a cumplirse. De hecho, recientemente, se ha observado que nanopartículas de Pd de 2.4 nm tienen comportamiento ferromagnético (ciclo de histéresis) como se observa en la figura 3b [3].

Figura 3. (a) Ilustración de la estructura de bandas de un metal, mostrando los niveles ocupados y los cambios de energía cinética cuando un electrón cambia su espín (b) Ciclo de histéresis de nanopartículas de Pd de 2.4 nm (tomada de ref. [3])



Si bien los efectos de tamaño producen modificaciones importantes de las propiedades magnéticas de los materiales, los efectos de superficie son responsables de las modificaciones aun más espectaculares en su comportamiento magnético. Como hemos indicado anteriormente, en los sistemas nanométricos la superficie adquiere una importancia aun mayor que en el caso de los materiales masivos, debido a la elevada fracción de átomos que se encuentran en ella. Para una partícula de 1 cm de radio, por cada átomo de superficie tenemos 100 millones de átomos de volumen. Son por tanto

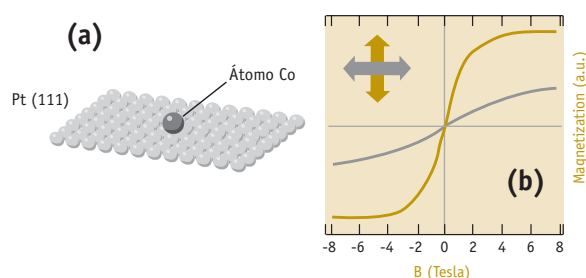
estos átomos de volumen los que determinan las propiedades de la partícula a nivel macroscópico. Pero si la partícula tiene 1 nm de radio, los átomos de la superficie pasan a ser del orden del 50 % del total. Como es bien sabido, los átomos de la superficie no son iguales que los del volumen: mientras que en el volumen los átomos ven un entorno igual por todos lados, los de la superficie ven dos zonas distintas. Además, los átomos de la superficie tienen menos enlaces, o bien tienen enlaces de otra naturaleza. Algunos experimentos recientes parecen indicar que los efectos superficiales, no sólo modifican las propiedades magnéticas de los materiales sino que originan nuevos mecanismos que pueden dar lugar a un orden magnético; estamos hablando de un nuevo magnetismo que aparece sólo en sistemas nanométricos debido a las características intrínsecas de la nanoescala.

El magnetismo de los materiales masivos esta basado en tres elementos: la existencia de momentos magnéticos, la interacción de canje entre estos momentos (que tiende a mantenerlos paralelos entre si) y la anisotropía (que tiende a orientar los momentos en ciertas direcciones espaciales).

Sin embargo, algunos experimentos novedosos, ponen de manifiesto que en la nanoescala, se puede tener orden magnético sin interacciones de canje. Gambardella y colaboradores [4], han observado recientemente un comportamiento típico de materiales ferromagnéticos en átomos de cobalto aislados depositados sobre la superficie del platino como muestra en la figura 4. Es evidente que si los átomos de cobalto están aislados no puede haber interacción de canje ya que no tienen cerca otros átomos magnéticos con los que interaccionar. En este caso, el enlace entre el átomo de cobalto y los átomos de platino de la superficie bloquea los orbitales atómicos del cobalto involucrados en el enlace (los orbitales 3d, que son también los responsables del momento magnético del cobalto) en la dirección del enlace, lo que da lugar a un comportamiento similar al de los materiales ferromagnéticos. Se trata por tanto de un magnetismo que solo requiere la existencia de momentos magnéticos y la anisotropía. Y recordemos que una de las características intrínsecas de la nanoescala es la falta de simetría (como la que produce la superficie) que genera anisotropía: los átomos de superficie “ven” dos entornos distintos, lo que puede orientar su distribución electrónica de para minimizar la energía y por tanto orientar sus momentos. Este descubrimiento abre la puerta a que en sistemas nanométricos observemos comportamiento típico de los

materiales ferromagnéticos (histéresis, coercitividad, remanencia) en materiales que no son magnéticos.

Figura 4. (a) Ilustración de átomos de Co individuales depositados sobre una superficie de Pt [111]. (b) Comportamiento magnético de los átomos de Co en función de la orientación del campo (de ref. [4], cortesía de P. Gambardella)

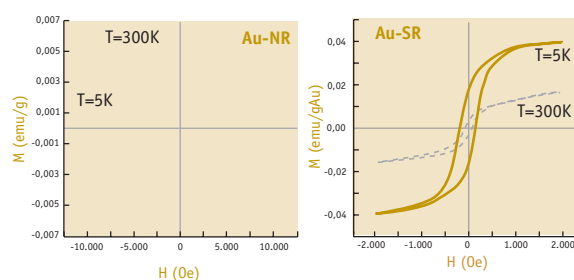


Otro resultado reciente que muestra la gran modificación del comportamiento magnético de los materiales que se produce en la nanoescala, ha sido la observación de comportamiento ferromagnético en nanopartículas y películas de oro [5,6]. Este caso es aun más sorprendente que el de los átomos de cobalto, ya que, a diferencia del cobalto, el oro es un material diamagnético, sus átomos no tienen momento magnético y sus capas electrónicas están completas. Sin embargo, al recubrir nanopartículas de oro con unas moléculas llamadas tioles (constituidas por carbono, hidrógeno y azufre) que también son diamagnéticas, el resultado es que la nanopartícula se vuelve ferromagnética (figura 5). Cuando la nanopartícula o la película de oro se recubre con tioles, los átomos de azufre que se encuentran al final de la cadena del tiol se enlazan con el oro mediante un enlace covalente. En este fuerte enlace hay una pequeña transferencia de carga del oro hacia el azufre, lo que hace que la última capa electrónica del oro ya no esté completa y aparezca un pequeño momento magnético por cada átomo de oro que se enlaza con un azufre. Este momento magnético está asociado a los electrones que intervienen en el enlace, y queda por tanto orientado en la dirección del enlace, generando un momento magnético permanente que no desaparece en ausencia de campo magnético. Conviene resaltar que la aparición del magnetismo en oro es un efecto de nanoescala. Si recubrimos una partícula de Au de 1 cm de radio con tioles, los átomos de la superficie también serían magnéticos, pero debemos recordar que estos son sólo 1 de

cada cien millones. En el caso de la nanopartícula también son los átomos de superficie los responsables del magnetismo y estos constituyen casi la mitad del total.

La conclusión de se puede extraer de estos experimentos es que de los tres elementos necesarios para el ferromagnetismo en materiales masivos (momentos magnéticos, canje y anisotropía) el canje no es imprescindible para observar orden magnético en la nanoescala, y los momentos magnéticos y la anisotropía se pueden inducir en la superficie (que representa una fracción importante de cualquier sistema nanométrico). Estos resultados parecen indicar que se ha roto la barrera que limitaba la observación del magnetismo a unos pocos materiales de la tabla periódica y que se puede observar orden magnético en otros materiales: en los próximos años asistiremos a descubrimientos sorprendentes que nos hagan reformular las teorías del magnetismo a tamaño nanométrico y nos ayuden a comprender los aspectos aun desconocidos de los materiales magnéticos masivos.

Figura 5. Ciclo de histéresis de las nanopartículas de Au (1.5 nm) recubiertas de tioles (de ref. [6])



A pesar de la corta edad de la nanociencia, ya existen muchas aplicaciones de los sistemas nanométricos. Las nanopartículas tienen aplicaciones tecnológicas, pero es posiblemente en el campo de las aplicaciones biomédicas donde están depositadas mas esperanzas. Si el siglo XX fue el siglo de la física, parece cada vez mas claro que el siglo XXI será el de la biología. Gran parte del avance reciente de la biología viene propiciado por su interacción cada vez mas estrecha con la física y en particular con la nanotecnología y por el uso de técnicas que hasta ahora se aplicaban solo en el ámbito de la física del estado sólido. Gracias a los avances de la nanotecnología en los últimos años, hoy en día, podemos fabricar, observar y manipular objetos de tamaño nanométrico, que es precisamente el "tamaño biológico". Como muestra la

figura 6, las nanopartículas tienen un tamaño similar al de muchas entidades biológicas como células, genes, virus o cadenas de ADN. Por ello, estas partículas pueden interactuar de manera individual con estas entidades y actuar como “nanorobots” que permitan reparar, eliminar o entregar medicamentos a células de manera selectiva.

Figura 6. Ilustración de los tamaños de una nanopartícula y distintos entes biológicos.



Otra ventaja del tamaño de las nanopartículas es que sus dimensiones son inferiores al diámetro de los vasos capilares, por lo que una vez introducidas en un organismo vivo, pueden viajar a través del sistema circulatorio, abriendo la posibilidad al desarrollo de aplicaciones “in vivo”. Si bien hay muchos tipos de nanopartículas con aplicaciones potenciales en biomedicina, resulta evidente la gran ventaja que presentan las nanopartículas magnéticas. Las fuerzas magnéticas no necesitan contactos por lo que pueden aplicarse para manipular partículas introducidas dentro de un organismo vivo. De esta forma, si se introducen nanopartículas con ciertos medicamentos adheridos dentro del cuerpo, se pueden utilizar fuerzas magnéticas (imanes) para dirigir las partículas a ciertas zonas del cuerpo y hacer que los medicamentos se liberen y actúen mayoritariamente en la zona afectada, aumentando la eficacia del tratamiento. En el caso de tratamientos “agresivos” como los empleados en quimioterapia, esta técnica también permitiría reducir los efectos secundarios sobre el resto del cuerpo.

Otra ventaja de las nanopartículas magnéticas es que debido a su histeresis, al aplicar campos magnéticos que varían rápidamente en el tiempo, las partículas disipan calor. Se sabe que las células humanas mueren a una temperatura aproximada de 45° C y en el caso de células mutadas

(cancerígenas) esta temperatura es aproximadamente un grado inferior. Sin embargo es difícil calentar una zona del cuerpo a temperatura necesaria para eliminar las células dañinas sin eliminar gran parte de las células sanas debido a los gradientes de temperatura. Si se fabrican nanopartículas magnéticas y se añaden ciertas cadenas orgánicas, se puede conseguir que estas nanopartículas queden adheridas de manera selectiva a las células dañinas. Aplicando posteriormente campos magnéticos alternos se pueden calentar las nanopartículas y por tanto las células enfermas hasta eliminarlas, sin dañar excesivamente las células sanas. Este tipo de tratamientos recibe el nombre de *hipertermia* y es uno de los campos de investigación más activos que muestran como la unión de la física y la biología puede conducir a nuevas aplicaciones.

En este sentido, una de las mayores limitaciones del uso de nanopartículas en biomedicina es la baja biocompatibilidad de los materiales ferromagnéticos clásicos (hierro, cobalto, níquel) que pueden producir daños en el organismo cuando se encuentran en forma de iones. Por ello, el descubrimiento de magnetismo en los metales nobles (que son altamente biocompatibles) a escala nanométrica puede suponer un gran avance en el uso de estas nanopartículas para aplicaciones *in vivo*.

En resumen, podemos decir que la investigación sobre las propiedades magnéticas de las nanoestructuras, estamos descubriendo nuevos fenómenos sorprendentes que lo convierten en un campo de investigación apasionante, tanto por toda la nueva física que encierran, como por sus aplicaciones potenciales.

BIBLIOGRAFÍA

- FEYNMAN, R. P. (1960) “*There’s plenty of room at the bottom: An invitation to enter in a new field of physics*”. Caltech Eng. And Sci. Volumen feb. La transcripción de esta conferencia esta disponible en <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- MOORE, G. E. (2003) disponible en <http://www.intel.com/technology/mooreslaw/index.htm>
- AMPEDRO, B. et al, (2003) Phys. Rev.Lett. 91, 237203.
- GAMBARDELLA, P. et al, (2003) Science 300, 1130.
- CARMELI, I.; LEITUS, G.; NAAMAN, R.; REICH, S.; VAGER, Z.; CHEM, HEM, J. (2003) Phys.118, 10372.
- CRESCO, P. et al, (2004) Phys. Rev. Lett. 93, 087204.

Nanobioteconología: avances diagnósticos y terapéuticos

Laura M. Lechuga

Grupo de Biosensores. Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM-CNM). CSIC
Isaac Newton, 8.PTM. 28760, Tres Cantos, Madrid.

resumen

La Nanobioteconología, convergencia entre la Nanoteconología y la Biotecnología, es la rama de la Nanoteconología que se perfila como la de mayor impacto en un futuro próximo debido a sus importantes aplicaciones, especialmente, diagnósticas y terapéuticas. La detección temprana de enfermedades (como el cáncer), su tratamiento precoz a nivel personalizado y el posterior seguimiento de su evolución serán posibles en los próximos años gracias a la aplicación de las herramientas nanobioteconológicas que se están actualmente desarrollando. Este artículo pretende dar una visión de lo que es la Nanobioteconología en general y la Nanomedicina, en particular, mostrando los más importantes avances en estos campos que podrían dar lugar a nuevos sistemas de diagnóstico y terapéuticos de mayor eficacia que los existentes, lo que redundaría en una mayor calidad de vida para los ciudadanos.

palabras clave

Nanobioteconología
Nanomedicina
Nanobiosensores
Liberación de Fármacos
Nanoherramientas

abstract

Nanobioteconology, convergence of the Nanotechnology and the Biotechnology fields, is one of the Nanotechnology areas which will have a huge impact in the near future mainly due their applications in the early diagnosis and therapeutics. The early detection of diseases as cancer, the personalised treatments and the disease post-evolution recording will be possible, in the coming years, due to the application of the nanobioteconological tools under development. This article will provide an overview about the Nanobioteconology in general and the Nanomedicine in particular, showing the most important advances in these areas. New diagnostic and therapeutic tools of higher performance that the existing ones could be implemented, providing a higher quality of life for the citizens.

keywords

*Nanobioteconology
Nanomedicine
Nanobiosensors
Drug Delivery Systems
Nanotools*

- Sistemas que proporcionen información en tiempo real de los efectos terapéuticos y/o de la cirugía sobre la zona tumoral.
- Agentes que pueden predecir cambios moleculares y prevenir que las células precancerosas se conviertan en malignas.

Así, el Instituto Nacional del Cáncer de Estados Unidos ha puesto en marcha un ambicioso programa basado en Nanobiotecnología cuyo objetivo principal es la erradicación del cáncer antes del año 2015 basado en una combinación de los cuatro puntos anteriores en una misma plataforma que podría incluso actuar en el interior del cuerpo humano.

Aunque uno de los principales motores en el desarrollo de la nanobiotecnología es mejorar la diagnosis de enfermedades y su tratamiento, las oportunidades de esta rama de la Nanotecnología se extienden por igual a otros ámbitos, como al diseño de nuevos fármacos, el control medioambiental, la cosmética, las aplicaciones en energía, las aplicaciones electrónicas, etc. Por ejemplo, mejorar el entendimiento de los procesos naturales podría facilitar el desarrollo de fabricación a escala molecular bioinspirada de nuevos materiales que pudiera emplearse como chip electrónicos reemplazando a los actuales. Ya se está trabajando en la computación molecular basada en la capacidad del ADN para almacenar y procesar información consiguiendo una codificación de los datos en cadenas de ADN y utilizando técnicas de biología molecular para llevar a cabo operaciones lógicas y aritméticas. Un ordenador de ADN podría ser miles de veces más rápido que los actuales pero con un menor consumo energético. La investigación en computación con ADN *in vitro* e *in vivo* que se está realizando hoy en día nos está proporcionando información relevante acerca de las capacidades computacionales de los seres vivos.

2. NANOMEDICINA

La Nanomedicina agrupa tres áreas principales: el nanodiagnóstico, la liberación controlada de fármacos y la medicina regenerativa. El nanodiagnóstico desarrolla sistemas de análisis y de imagen para detectar una enfermedad o un mal funcionamiento celular en los estadios más tempranos posibles. Los nanosistemas de liberación de fármacos transportan los medicamentos sólo a las células o zonas afectadas porque así el tratamiento será más efectivo y con

menos efectos secundarios. La medicina regenerativa pretende reparar o reemplazar tejidos y órganos dañados aplicando herramientas nanobiotecnológicas. Además de estas áreas principales, otros grandes retos de la nanomedicina es desarrollar nanoherramientas para manipular células, individuales o en grupos de fenotipo común, mediante la interacción específica con los propios nanoobjetos naturales de las células (receptores, partes del citoesqueleto, orgánulos específicos, compartimentos nucleares...). Ya se están desarrollando nanopinzas y herramientas quirúrgicas de pequeño tamaño que permitirían localizar, destruir o reparar células dañadas.

Como muestra del interés que suscita la temática de la Nanomedicina, una de las primeras plataformas tecnológicas en ponerse en marcha cara al Séptimo Programa Marco de la Unión Europea ha sido la Plataforma Europea de Nanomedicina (www.cordis.lu/nanotechnology/Nanomedicine.htm), agrupando a un gran número de las empresas (multinacionales y PYMES), centros de investigación y universidades que trabajan en esta temática dentro de la Unión Europea. Desde abril de 2005 funciona también la Plataforma Española de Nanomedicina (www.nanomedspain.net) que agrupa a las principales empresas y grupos de I+D trabajando en esta temática en nuestro país y que está integrada en la Plataforma Europea.

2.1. Nanosistemas de diagnóstico y tratamiento

El objetivo del *Nanodiagnóstico* es identificar la aparición de una enfermedad en sus primeros estadios a nivel celular o molecular e idealmente al nivel de una sólo célula, mediante la utilización de nanopartículas o nanodispositivos (nanobiosensores, biochips de ADN, laboratorios-en-un-chip, nanopinzas, nanosondas...). De esta forma tendríamos una capacidad de respuesta más rápida para tratar las enfermedades y de reparar o recrear tejidos y órganos humanos. Los nanosistemas se pueden aplicar *in-vitro* o *in-vivo*. En aplicaciones de diagnóstico *in-vitro*, los nanodispositivos son capaces de detectar con gran rapidez, precisión y sensibilidad la presencia de patógenos o defectos en el ADN a partir de muestras de fluidos corporales o de tejidos. En aplicaciones de diagnóstico *in-vivo*, se pueden desarrollar dispositivos biocompatibles que, por ejemplo, pueden penetrar en el cuerpo humano para identificar

estadios iniciales de una enfermedad, identificar y cuantificar la presencia de una determinada molécula o de células cancerígenas, etc.

Nanopartículas

Existen muchos trabajos pioneros que demuestran la posibilidad de detectar la aparición de las primeras células cancerosas utilizando diferentes tipos de nanopartículas. Por ejemplo pueden utilizarse **puntos cuánticos** ("Quantum Dots"), así denominados porque su tamaño nanométrico provoca un efecto de confinamiento cuántico en su estructura. Los puntos cuánticos están fabricados de material semiconductor y contienen sólo unos cientos de átomos y cuando son excitados emiten luz en diferentes longitudes de onda dependiendo de su tamaño, por lo que son extremadamente útiles como marcadores biológicos de la actividad celular. Los puntos cuánticos más empleados son los de CdSe, mostrados en la Figura 2, ya que son fáciles de fabricar a medida mediante procesos químicos, se pueden producir en gran variedad de colores, tienen una emisión excelente (mejor que los marcadores fluorescentes habitualmente usados en biología), y no se desestabilizan ya que son fotoestables. La emisión de fluorescencia de los puntos cuánticos es tan brillante que es incluso posible detectar una célula que contenga una única de estas nanopartículas (ver figura 2). Los puntos cuánticos son hoy en día comerciales y diversos grupos de investigación ha demostrado con éxito su utilidad para la localización de tumores en los primeros estadios, por lo que se puede proceder a su extirpación inmediata. Para conseguir esta localización hay que recubrir la superficie del punto cuántico con moléculas biológicas (bioreceptores) con afinidad hacia un compuesto específico, (por ejemplo, cierta proteína ó ciertas moléculas que se encuentran en mayor proporción en la superficie de las células cancerosas como los receptores de ácido fólico o la hormona luteinizante) asociado con un tipo de cáncer en particular. Cuando los puntos cuánticos se acercan a una muestra que contiene dicha proteína, ambos se unen y se podría detectar la interacción iluminando los nanocristales con luz ultravioleta y observando su emisión característica. La Figura 3 muestra un ejemplo de tal localización. Ya se ha demostrado su utilidad para la localización de células cancerosas de cáncer de mama y de ganglios linfáticos cancerosos. Debido a la cantidad de colores en que pueden emitir, los puntos cuánticos se pueden combinar para detectar diversas sustancias, células tumorales, antígenos, etc...de forma simultánea.

Figura 2. (superior) Puntos cuánticos de CdSe ampliamente utilizados como marcadores para el diagnóstico biológico. Puede observarse el diferente color de la disolución según el tamaño nanométrico de los nanocristales. (inferior) cuando los puntos cuánticos se recubren con el bioreceptor adecuado pueden emplearse como dianas específicas. En el ejemplo se muestra la localización en una única célula de ciertos componentes celulares.

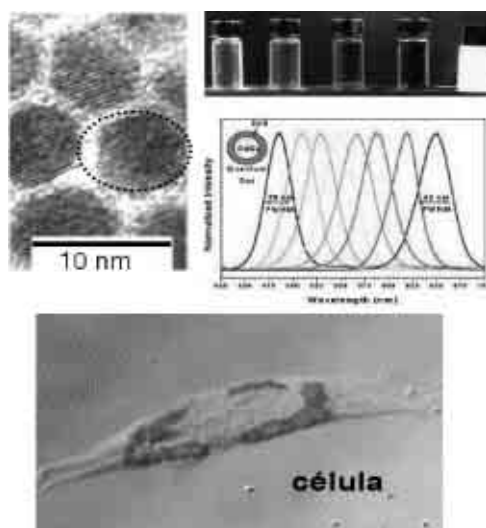
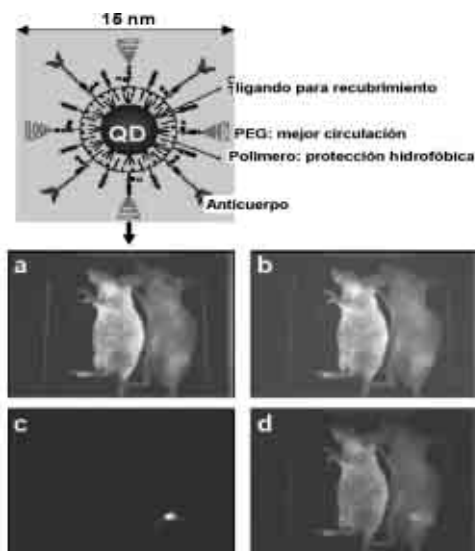


Figura 3: Funcionalización de Puntos cuánticos de CdSe con los biomarcadores específicos e inyección de los mismos en un ratón para la localización precoz de las primeras células cancerosas.



Igualmente se han utilizado nanopartículas magnéticas con el recubrimiento adecuado para la localización de las células tumorales. Para ello se recubren las nanopartículas con surfactantes que poseen una zona hidrófila y otra hidrófoba. Una vez que estas nanopartículas se unen a las células cancerosas, se puede inducir un calentamiento de las mismas mediante un campo magnético de baja intensidad. El calentamiento provoca la destrucción de las células tumorales pero sin causar ningún daño a las células o tejidos sanos circundantes. Esta tecnología para el tratamiento del cáncer evitaría los graves problemas de efectos secundarios que conllevan los actuales tratamientos de quimio o radioterapia.

Los trabajos de la Universidad de Northwestern y de la Universidad Johns Hopkins ya han demostrado la aplicación de las nanopartículas para detectar y tratar cáncer a nivel molecular demostrando su utilidad en la destrucción de células tumorales de pacientes con cáncer de hígado, pulmón o páncreas. Asimismo las nanopartículas se pueden emplear para la detección precoz de la enfermedad del Alzheimer mediante la detección del ligando ADDL, biomarcador específico de dicha enfermedad que aparece en los primeros estadios de la misma.

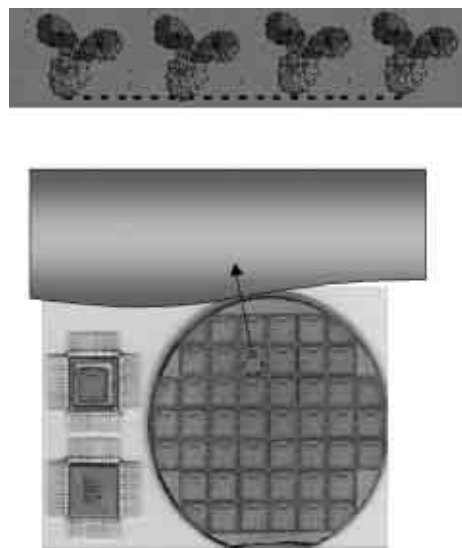
En aplicaciones in-vivo, las nanopartículas también pueden emplearse para transportar moléculas de metal que se usan como agente para obtener mejores imágenes del interior del cuerpo humano mediante resonancia magnética. Funcionalizando estas nanopartículas es asimismo posible obtener imágenes de tumores de apenas un par de milímetros. Algunos de estos nanoagentes de contraste ya han sido aprobados para su utilización rutinaria en clínica. Igualmente se pueden utilizar para obtener mejores contrastes en imágenes óptica, de Rayos-X y por ultrasonidos. La combinación de estos agentes de imagen con los dispositivos de diagnóstico es otra de las líneas emergentes de investigación en nanodiagnóstico.

Nanobiosensores

Otra de las grandes áreas del nanodiagnóstico son los nanobiosensores, dispositivos capaces de detectar en tiempo real y con una alta sensibilidad y selectividad agentes químicos y biológicos. Un biosensor es un dispositivo compuesto por dos elementos fundamentales: un receptor biológico (por ejemplo proteínas, ADN, células,.....)

preparado para detectar específicamente una sustancia y un transductor o sensor, capaz de interpretar la reacción de reconocimiento biológico que produce el receptor y traducirla en una señal cuantificable. En la Figura 4 se muestra el esquema básico de la estructura de un biosensor. El término "nanobiosensor" designa a aquellos biosensores cuyas propiedades vienen moduladas por la escala nanotecnológica con la que están fabricados. Es de esperar que los nanobiosensores tengan una sensibilidad mucho más alta que la de los dispositivos convencionales. Además podrían ser fácilmente introducidos en el interior del cuerpo humano, por lo que podrían proporcionar datos mucho más fiables del estado de salud de un paciente. Dentro de los incipientes desarrollo de nanobiosensores son de destacar los nanobiosensores fotónicos, los basados en nanopartículas de oro o magnéticas, los nanobiosensores tipo FET basados en nanotubos de carbono, los biosensores nanomecánicos tipo MEMS/NEMS, que han surgido como reemplazo de los biochips de ADN, entre los más importantes.

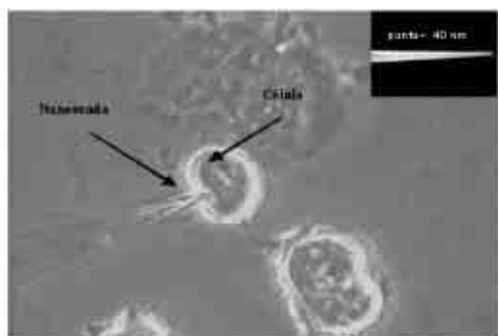
Figura 4. Fabricación de nanobiosensores con tecnología microelectrónica. El biosensor está formado por un transductor similar a los circuitos integrados de silicio y una capa bio-receptora para el análisis específico de la sustancia a determinar.



El grupo de Vo-Dighn del Oak Ridge National Laboratory (US) ha desarrollado un nanosensor óptico (ver Figura 5) que permite la medida en el interior de una única célula de su

estado metabólico. El nanosensor consiste en una fibra óptica muy afilada (su extremo final tiene sólo 30-50 nm) lo que le permite penetrar a través de la membrana celular sin causar ningún daño y sin alterar el funcionamiento normal de la célula. La fibra óptica se biofuncionaliza con anticuerpos específicos antes de su introducción. Una vez dentro, la nanosonda puede detectar especies químicas y señalar procesos moleculares en localizaciones específicas dentro de la célula. La detección se realiza a través de la interacción del campo evanescente de la luz que circula por la fibra óptica con la interacción biomolecular que tiene lugar con el bioreceptor específico anclado en la superficie del extremo final de la fibra. Con esta técnica se abre la posibilidad de identificar cambios patológicos dentro de una célula individual e incrementar nuestro conocimiento sobre las funciones celulares in-vivo como la división celular, la apoptosis, funcionamiento de las nanomáquinas biológicas, etc....

Figura 5. Medida de la actividad metabólica de una única célula mediante una nanosonda fotónica. El nanosensor está constituido por una fibra óptica muy afilada que no daña la pared celular y permite el registro de su actividad a través de la interacción del campo evanescente de la luz que circula por la fibra previamente biofuncionalizada.



Los biosensores nanofotónicos desarrollados por nuestro grupo han demostrado tener una de las mayores sensibilidades obtenidas hasta la fecha en la detección directa de proteínas y ADN, tal como se muestra en la Figura 6. En estos sensores (llamados de onda evanescente) se hace uso de la forma particular en que las guías de ondas transmiten la luz: esta transmisión tiene lugar a lo largo de la guía mediante múltiples reflexiones internas en condiciones de Reflexión Interna Total. A cada reflexión, una componente de la luz, denominada onda evanescente, se propaga en el

medio que envuelve a la guía. La longitud de penetración de la onda evanescente está comprendida entre 50-300 nm y ofrece una oportunidad *única e ideal* para medir cualquier reacción bioquímica que tenga lugar en su interior. Nuestro biosensor está fabricado con tecnología microelectrónica de silicio y detecta de forma interferométrica el cambio inducido en las propiedades de la luz como consecuencia de la interacción biomolecular en la zona evanescente. Con este sensor es posible evaluar concentraciones de proteínas a nivel picomolar o variaciones de una única base en el ADN en tan sólo unos minutos. Este y otros tipos similares de nanobiosensores fotónicos son el objetivo del proyecto MICROSERES, recientemente financiado por la Comunidad de Madrid, donde se abordarán mejoras en estos desarrollos y su integración en microsistemas.

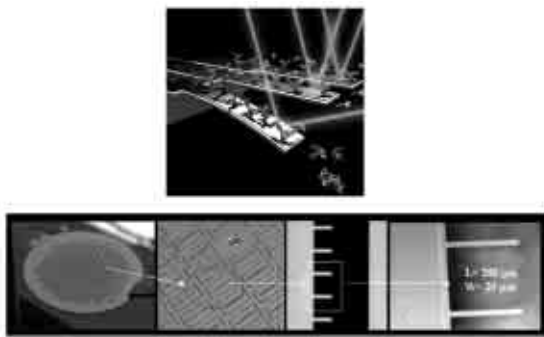
Figura 6. (izq) Biosensor nanofotónico basado en guías de ondas de tan sólo 4 nm de altura fabricado con tecnología de silicio. (drcha) El biosensor presenta una extremada sensibilidad y permite distinguir de forma rápida y directa las variaciones de una única base en el gen BRCA1, variaciones indicativas de la predisposición a padecer cáncer de mama (trabajo desarrollado por la autora del artículo).



Otro tipo de nanobiosensor en desarrollo son los biosensores nanomecánicos, que emplean como sistema de transducción la deflexión nanométrica de una micropalanca o el desplazamiento de su frecuencia de resonancia al interaccionar con el sistema biológico. Este tipo de biosensores son conocidos como biosensores nanomecánicos dado que el cambio en la posición y movimiento de la micropalanca inducido por el reconocimiento molecular ocurre a escala de unos pocos nanómetros. La respuesta nanomecánica del biosensor puede ser dividida en estática, referida a la posición promedio de la micropalanca, y

dinámica, referida a la oscilación de la micropalanca a frecuencias alrededor de la de resonancia. La Figura 7 muestra el esquema básico de funcionamiento de estos biosensores y las imágenes de algunos de estos sensores desarrollados por los autores. Las micropalancas tienen un área sensora muy pequeña (del orden de 1000 nm^2) lo cual permite el análisis de cantidades de analito inferiores al femtomol. Además se fabrican con tecnología microelectrónica bien establecida que proporciona producción en masa a bajo coste y que permite la fabricación de matrices de decenas, incluso miles, de micropalancas para la detección simultánea de múltiples analitos.

Figura 7. Nanobiosensor basado en micropalancas. (Superior) las micropalancas se doblan unos pocos nanómetros cuando tiene lugar una reacción de reconocimiento molecular en su superficie. (Inferior) Nanobiosensor de matrices de micropalancas fabricadas en uno de los proyectos de los autores del artículo que puede emplearse como biochip de ADN o proteómico según la biofuncionalización.



Desarrollos como los nanosensores fotónicos o los nanomecánicos, fabricados a miles gracias a la tecnología microelectrónica, abre un camino para la fabricación de *nanobiochips* genómicos y proteómicos, que a diferencia de los actuales biochips, llevan incorporado un sistema de transducción de la interacción (no se necesitarían marcadores fluorescentes) con los que sería posible conseguir en muy poco tiempo gran cantidad de información genética lo que permitirá elaborar vacunas, identificar mutaciones indicativas de enfermedades, identificar nuevos fármacos, identificar patógenos, etc...

Pero a pesar de estos incipientes desarrollos, todavía queda mucho camino por recorrer y cara al futuro, sería deseable contar con nanobiosensores que cumplieran la mayoría de los siguientes requisitos: robusto, barato, posibilidad de multianálisis, detección a niveles de pico/femtomolar o incluso a nivel de una sola molécula, rápidos y directos, portátiles, de fácil manejo por parte de personal no especializado, regenerable o suficientemente barato para ser de un único uso. El trabajo futuro se debería encaminar tanto al desarrollo de nuevas estrategias de inmovilización y de protección, para permitir biosensores completamente reversibles y regenerables y que puedan operar *in situ* en muestras complejas (como es la sangre) y que sean biocompatibles para operar *in vivo*.

La integración en sistemas "lab-on-a-chip" será otras de las áreas fundamentales de trabajo, que permitirá la descentralización de las medidas. El término "lab-on-a-chip" (o "laboratorio en un chip") describe el desarrollo de plataformas integradas y miniaturizadas donde tienen lugar complejas reacciones químicas y bioquímicas (ver figura 8). Estas plataformas se están constituyendo como una tecnología revolucionaria en el sector clínico. Las micro y nanotecnologías han proporcionado las herramientas necesarias para llevar a cabo esta innovación en el diagnóstico molecular, al permitir la fabricación e integración de micro/nanobiosensores, microcanales, microactuadores, etc en un mismo chip microelectrónico. Las claras ventajas en cuanto a rapidez del análisis, pequeño tamaño, bajo consumo, paralelismo y reducción de costes gracias a la producción en masa, son los principales motores de su desarrollo. De momento todavía no se cuenta con ningún desarrollo de microsistema biosensor que haya llegado al mercado, pero numerosos laboratorios a nivel internacional trabajan en esta dirección.

Figura 8. Microsistema "laboratorio-en-un-chip"



Un simple microsistema con nanosensores incorporados podría ofrecer un diagnóstico completo a partir de una gota de sangre mediante la identificación (de otra manera imperceptible) de cambios moleculares. Esto implica que los análisis podrían hacerse a domicilio. Cuando empezemos a reemplazar los caros y lentos análisis de laboratorio por estos análisis de microchips más baratos, rápidos y cómodos, el impacto en organizaciones sanitarias y sus pacientes será tremendo. Por ellos, ya hay nuevas empresas en el sector de la nanobiotecnología que han comenzado a desarrollar distintos sensores. Nanosys (ver <http://www.nanosysinc.com>) se plantea lanzar al mercado un sensor para la detección del cáncer de próstata en tres años. Molecular Nanosystems (ver <http://www.monano.com/>) ha construido un instrumento capaz de detectar glucosa con un único nanotubo de carbono midiendo señales eléctricas que corresponden a las concentraciones de glucosa. La página "web" de la empresa Nanosphere ofrece una buena descripción de cómo funcionan estos sistemas (ver <http://www.nanosphere-inc.com/index.htm>). El siguiente paso es el desarrollo de un nanobiosensor implantable para diabéticos. Dentro del panorama español, Sensia,SL (www.sensia.es) está desarrollando microsistemas basados en nanosensores fotónicos y nanomecánicos.

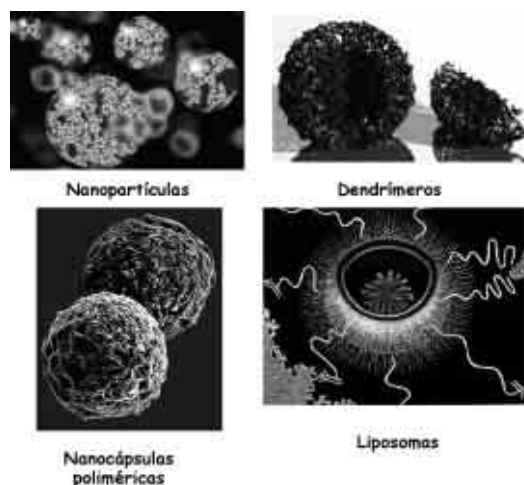
2.2. Liberación controlada de fármacos

Los fármacos necesitan ser protegidos durante su tránsito por el cuerpo hasta llegar al lugar afectado, tanto para mantener sus propiedades físico-químicas como para proteger a las otras partes del cuerpo por las que viaja de sus efectos adversos. Una vez que el fármaco llega a su destino, necesita liberarse a una velocidad apropiada para que sea efectivo. Este proceso no siempre es óptimo con los medicamentos actuales por lo que la Nanomedicina está ofreciendo métodos para mejorar tanto las características de difusión del fármaco como las de degradación del material encapsulante, permitiendo que el fármaco se transporte de forma mucho más eficaz y que su liberación sea igualmente más controlada. Con las nuevas tecnologías se podría suministrar dosis más bajas al paciente para conseguir los mismos efectos, al mejorarse la termoestabilidad, el tiempo de vida y la protección de estos medicamentos frente a los tradicionales. La formulación de fármacos en forma nanoestructurada aumenta su solubilidad y eficacia por lo que ya existen en el mercado más de 100 fármacos de este tipo y muchos otros están en desarrollo.

Además este tipo de formulación permite utilizar rutas de administración más efectivas (oral, trascutánea y pulmonar) y alcanzar localizaciones en el cuerpo que tradicionalmente han sido difíciles, como el cerebro.

Pueden emplearse diversos tipos de nanoestructuras como vehículos para la administración de fármacos tanto oralmente como inyectados en sangre. Entre ellas cabe destacar la utilización de nanopartículas de material cerámico, nanocapsulas, dendrímeros, liposomas, micelas,... (ver Figura 9). Además estos transportadores están jugando un papel crucial en el desarrollo de tecnologías de liberación de fármacos específicamente en el lugar dañado o enfermo, permitiendo transportar fármacos, vacunas y ADN a las células y tejidos afectados pero sin interferir negativamente en otras zonas del cuerpo. Por ejemplo, en el caso de los fármacos anticáncer, usando nanoestructuras las dosis suministradas pueden ser mucho menores que las típicamente aplicadas en quimioterapia, y si la sustancia se dirige de modo directo al tumor, las cantidades efectivas allí aplicadas pueden ser entre diez y mil veces mayores que las que llegan a destino por las vías habituales. Además se evitan así los no deseados efectos secundarios típicos de la quimioterapia.

Figura 9. Diferentes nanosistemas empleados para la dosificación controlada de fármacos.



Las nanopartículas que se utilizan para este propósito son sintetizadas a partir de materiales orgánicos (lípidos, polímeros, liposomas..) pero ya se están desarrollando nanotransportadores inorgánicos (partículas magnéticas,

puntos cuánticos de semiconductor, oro coloidal y nanopartículas de fosfato cálcico). Por ejemplo, la tecnología Nanocure está basado en nanopartículas inorgánicas que transportan un fármaco anticáncer a través de la barrera sangre-cerebro. Novartis Pharma está investigando el uso de dendrímeros para prevenir la respuesta autoinmune durante el trasplante de órganos.

El próximo paso será cargar las nanoestructuras con agentes anticáncer, sustancias que se podrían liberar en el interior de las células cancerosas para aumentar la efectividad del tratamiento. O bien estas nanoestructuras podrían prepararse para que al mismo tiempo puedan localizar y engañar a las células cancerosas para que las absorban. Una vez dentro, podrán descargar su carga farmacológica o utilizar otros métodos de combate, sin afectar a ninguna célula sana.

Se han realizado experimentos donde se inyecta al paciente un ferrofluido de nanopartículas magnéticas que llevan incorporada la medicación. Estas nanopartículas viajan a la zona afectada guiados por un campo magnético, reduciendo el efecto nocivo sobre las zonas sanas y mejorando la eficacia del tratamiento sobre la zona localizada.

2.3. Nanomedicina regenerativa

La nanomedicina Regenerativa es un área emergente que persigue la reparación o reemplazamiento de tejidos y órganos mediante la aplicación de métodos procedentes de terapia génica, terapia celular, dosificación de sustancias bioregenerativas e ingeniería tisular. La terapia génica se basa en utilizar células genéticamente modificadas, la celular en usar células madre y la liberación controlada de sustancias activas, citoquinas y factores de crecimiento propician la reconstrucción tisular. La ingeniería tisular intenta generar tejidos in vivo o in vitro para lo cual necesita materiales biocompatibles que imiten respuestas celulares específicas a nivel molecular. Gracias al desarrollo de las nanotecnologías los materiales tienen el potencial de interactuar con componentes celulares, dirigir la proliferación y diferenciación celular y la producción y organización de la matriz extracelular. Entre los materiales que se están utilizando cabe destacar los nanotubos de carbono, nanopartículas como nanohidroxiapatita o nanozirconia, nanofibras de polímeros biodegradables, nanocomposites, etc.... También se pueden utilizar superficies

con nanoestructuración nanométrica que actúen como incubadoras de líneas celulares y que favorecen el proceso de diferenciación celular (ver Figura 10). Los nuevos materiales así obtenidos pueden mejorar la adhesión, duración y tiempo de vida. Algunos ejemplos destacables incluyen polímeros a la nanoescala moldeados en válvulas de corazón y nanocomposites de polímeros para la regeneración ósea.

Figura 10. Crecimiento de células de fibroblasto sobre un sustrato nanoestructurado, método empleado en nanomedicina regenerativa.



Se está investigando sobre nanopolímeros que se puedan emplear para recubrir dispositivos en contacto con la sangre (por ejemplo, catéteres, corazones artificiales,..) que dispersen coágulos o prevengan su formación. Un equipo de investigación de la Universidad de Purdue, ha demostrado que los nanotubos de carbono podrían mejorar las aplicaciones de prótesis ortopédicas al crear implantes con la alineación en paralelo de estos nanotubos y de filamentos, favoreciendo la adhesión y el crecimiento celular.

Es de prever también que se puedan desarrollar nanoestructuras artificiales que puedan detectar y reparar daños en el organismo, de la misma forma que las nanoestructuras naturales lo hacen (por ejemplo los linfocitos de la sangre). Así se ha propuesto de forma teórica la fabricación de unas nanoestructuras para sustituir la hemoglobina, denominadas "respirocitos". Los respirocitos son células rojas nanofabricadas con una enorme capacidad para transportar oxígeno y que puede permitir pasar varias horas bajo el agua sin respirar. Según los cálculos de su creador, con una inyección de respirocitos podríamos vivir con el corazón parado durante 4 horas o bucear durante 2,5 horas. Otros interesantes desarrollos incluyen motores biomoleculares, interruptores moleculares o nanoagujas que penetren en el núcleo de células vivas con un alto grado de precisión para realizar cirugía celular.

3. CONCLUSIONES

La Nanobiotecnología es un área multidisciplinar que puede conllevar grandes avances diagnósticos y terapéuticos proporcionando nuevos métodos de diagnóstico más efectivos, mejores sistemas para la administración de fármacos y nanoherramientas para la monitorización in-situ de parámetros biológicos y reparación celular. Las nanoterapias, bien mediante la destrucción selectiva de células dañadas o infectadas o bien mediante la liberación controlada de fármacos en el lugar indicado se perfilan como uno de los grandes avances a lograr para mejorar la calidad de vida de nuestra sociedad.

El futuro nos deparará microchips implantables que administrarán los fármacos en dosis preprogramadas, fármacos que habrán sido elegidos "a la carta" según el perfil genético de cada individuo gracias al uso de micro/nanochips de ADN y que transmitirán sus datos al hospital para tener controlado al paciente mientras este hace su vida normal. Ya existen chips subcutáneos para medir de forma continua parámetros cruciales como el pulso, la temperatura y la glucosa, microsensores ópticos que se implantan en los tejidos subdérmicos para medir la circulación en los tejidos después de una operación o sensores MEMS que miden la presión, aceleración, velocidad angular y parámetros relacionados en pulmones paralizados y que ayudan en el diseño de pulmones artificiales. Ya se están manufacturando dispositivos "laboratorio-en-un-chip" y se están realizando ensayos clínicos para liberación de fármacos con productos nanotecnológicos. Sin embargo, los largos procesos de aprobación en los sectores médicos y farmacéuticos pueden significar que los beneficios para la salud y los beneficios económicos para las empresas llevarán mucho más tiempo que en otros campos. Aunque quedan muchos problemas por superar, no hay duda que la Nanobiotecnología nos deparará grandes avances que redundará en una mejora de la calidad de vida de nuestra envejecida sociedad y que ayudará a vencer a las principales enfermedades (cáncer, desórdenes neurodegenerativos y enfermedades cardiovasculares) de nuestro entorno.

BIBLIOGRAFIA

Cancer NANOTECHNOLOGY PLAN (2004) An strategic initiative to transform clinical oncology and basis research through the directed application of nanotechnology NCI, NIH, USA. (http://nano.cancer.gov/alliance_cancer_nanotechnology_plan.pdf)

- European Science Foundation Policy Briefing, ESF Scientific Forward Look on nanomedicine (2005) (www.esf.org)
- NIH Roadmap: Nanomedicine (2004), NIH, USA (<http://nihroadmap.nih.gov>, <http://www.capconcorp.com/roadmap04/>)
- Technology Platform on NanoMedicine: Nanotechnology for Health (2005) Vision Paper and Basis for a Strategic Research Agenda for NanoMedicine.
- BERRY, C. C. CUTIS, A. S. G. (2003) "Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine", *Journal of Physics* 36 R198.
- BOGUNIA-KUBIK, K.; SUGISAKA, M. (2002) "From molecular biology to nanotechnology and Nanomedicine", *BioSystems* 65, 123.
- BRIGGER, L.; DUBERNET, C.; COUVREUR, P. (2002) "Nanoparticles in cancer therapy and diagnosis". *Advanced Drug Delivery Review* 1, 631.
- FERRARI, M. (2005) "Cancer Nanotechnology: opportunities and challenges". *Nature Reviews Cancer* 5, 161.
- GABIZON, A.; SHMEEDA, H.; HOROWITZ, A. T.; ZALIPSKY, S. A. (2004) "Tumour cell targeting of liposome-entrapped drugs with phospholipids-anchored folic acid-PG conjugates". *Advanced Drug Delivery Review* 56, 1177.
- KUBIK, T.; BOGUNIA-KIBIK, K.; SUGISAKA, M. (2005) "Nanotechnology on duty in medical applications". *Current Pharmaceutical Biotechnology* 6, 17.
- MOGHIMI, S. M.; HUNTER, A. C.; MURRAY, J. C. (2005) "Nanomedicine: current status and future prospects". *The FASEB Journal* 19, 311.
- TABATA, Y. (2005) "Nanomaterials of drug delivery systems for tissue regeneration". *Methods in Molecular Biology* 300, 81.
- VASIR, J. K.; REDDY, M. K.; LABHASETWARL V. D. (2005) "Nanosystems in drug targeting: Opportunities and challenges". *Current Nanoscience* 1, 45.
- Whitesides, G. M. (2003) "The right size in nanobiotechnology" *Nature Biotechnology* 21, 1161.
- YIM, E. K.; REANO, R. M.; PANG, S. W.; YEE, A. F.; CHEN, C. S.; LEONG, K. W. (2005) "Nanopattern-induced changes in morphology and motility of smooth muscle cells". *Biomaterials* 26, 5405-5413.

Nanotecnología y Economía

Emilio Fontela

Universidad Antonio de Nebrija

resumen

La ciencia económica reserva el análisis de las nuevas tecnologías al campo de la mesoeconomía (sectores, territorios, instituciones). Este artículo se concentra en el ámbito sectorial y aborda en primer lugar la aportación esperada de las nanotecnologías a la estructura económica caracterizada por un modelo abierto de Leontief; en segundo lugar, vincula esta transformación estructural a la evolución de los ciclos económicos a largo plazo (Schumpeter), asociando el potencial de la nanotecnología al proceso de convergencia nano-bio-info-cogno (NBIC). Concluye con propuestas para la política científica y tecnológica en este campo.

palabras clave

“Input-Output”
Cambio Tecnológico
Ciclos Económicos

abstract

The economic science focuses new technologies analysis inside the meso-economic frame (sectors, territories, institutions). This article is concentrated on the sectoral scope taking into account the nanotechnology contribution to the economic structure characterized by Leontief open model. Besides this point of view, such structural transformation is linked to the economic cycles evolution in the long term (Schumpeter), establishing a relationship between the nanotechnology potential and the convergence process named “nano-bio-info-cogno” (NBIC). Finally, the article proposes several recommendations for the scientific and technological policy in this field.

keywords

*Input-Output
Technological Change
Economic Cycles*

1. INTRODUCCIÓN

No es frecuente que los economistas se interesen por el desarrollo específico de una tecnología que todavía se encuentra en sus inicios, como es el caso de la llamada nanotecnología.

La resistencia de los economistas a la hora de abordar temas tecnológicos está profundamente enraizada en su ciencia.

Aunque la obra fundadora de Adam Smith (*La riqueza de las naciones*, publicada en 1776) coincide con los inicios de la Revolución Industrial, su inspiración no se apoyaba en el flujo de nuevas tecnologías que en aquel momento invadían el mundo, sino en el quehacer de los burgueses, industriales y comerciantes, que buscaban con ahínco la libertad económica para ampliar sus actividades. Para la burguesía, la tecnología era estrictamente instrumental, un producto creativo de los inventores, totalmente exógeno a su actividad empresarial.

Durante un siglo, la ciencia económica se desarrolló esencialmente como un sistema deductivo a partir de las bases de Adam Smith, hasta el punto que en el centenario de la Riqueza de las Naciones hubo mociones en el mundo académico británico para dar por finalizada la ciencia económica (Stone, 1980)

Como ocurre con frecuencia en la historia del pensamiento científico, prácticamente en ese mismo año del centenario, exactamente en 1871 y 1874, se publicaron tratados de Stanley Jevons y de Leon Walras que introdujeron el razonamiento marginalista y el procedimiento de equilibrio general de los mercados, o sea que abrieron las puertas a la formalización matemática de la microeconomía, tal como hoy se enseña en las aulas universitarias. Esta economía contemporánea de los libros de texto se completa con el estudio de la macroeconomía, o sea del funcionamiento de los grandes valores agregados de los sistemas económicos nacionales, disciplina que se apoya en las reflexiones de Keynes sobre la Gran Depresión de 1930, y en las aportaciones de Stone sobre la medida de la contabilidad nacional en 1950.

La tecnología es la que define las funciones de producción, las características de las ofertas que intervienen en los mercados; sin duda tiene gran importancia en el modelo microeconómico, pero como cada producto tiene sus

tecnologías, una vez que la teoría ha reconocido esta importancia, excluye el contenido de cada tecnología de su campo de interés. Esta ciencia newtoniana maneja con elegancia ideas platónicas.

En macroeconomía el interés por la tecnología ha sido derivado de un resultado empírico: en las funciones de producción agregadas, al intentar identificar la aportación del trabajo y del capital al crecimiento económico, se puso en evidencia la existencia de un factor residual (el residuo de Solow) que explicaba una parte muy importante de este crecimiento. Este factor residual (también descrito como la progresión de la productividad total de los factores primarios, capital y trabajo) se interpretó como la aportación de la tecnología (y del capital humano, social y organizativo) al proceso de enriquecimiento de las naciones.

A pesar de este reconocimiento empírico de la importancia de la tecnología en general, en este caso para los macroeconomistas se trata de un factor intangible exógeno (que se puede endogeneizar con ayuda de procesos de inversión en I+D), que en todo caso no es analizable de manera detallada a nivel de tecnologías específicas. Aunque algún analista económico comente en ocasiones posibles relaciones directas entre un desarrollo tecnológico y el PIB, por ejemplo, el modelo teórico causal de esta relación no existe, por lo que en el mejor de los casos se trata de una correlación estadística escasamente significativa.

El problema más doloroso de la ciencia económica contemporánea es que, entre una microeconomía perfeccionada, profundamente deductiva y estática (que se concentra sobre los equilibrios y reequilibrios de mercados instantáneos que se obtienen por aproximaciones sucesivas), y una macroeconomía más inductiva y dinámica, hay un vacío interpretativo que se refiere a la naturaleza de los sectores económicos, de los territorios y de las instituciones. Este espacio, que debería cubrir la mesoeconomía como disciplina de conexión entre los agentes individuales y los comportamientos agregados, entre la estática y la dinámica, no está todavía sólidamente implantado en la ciencia económica neo-clásica, que prefiere buscar conexiones directas, pero desprovistas de todo realismo, entre los modelos microeconómicos de agentes individuales y los modelos de agregados macroeconómicos.

En realidad, es en la mesoeconomía que la tecnología adquiere su valor económico de transformación estructural, y es en este nivel intermedio en el que se sitúa el análisis *input-output* de Leontief (y sus aplicaciones sectoriales y territoriales), el análisis de la innovación de la escuela neoschumpeteriana, y las perspectivas historicistas de los analistas de los ciclos económicos de larga duración. Estas investigaciones, por el momento marginadas por la corriente neoclásica dominante, confluyen en el paradigma alternativo de la economía evolutiva, aunque es de esperar que con el tiempo acabe produciéndose una integración en forma de un desarrollo sólido de la mesoeconomía como campo complementario e indispensable para la aplicabilidad de la microeconomía y de la macroeconomía.

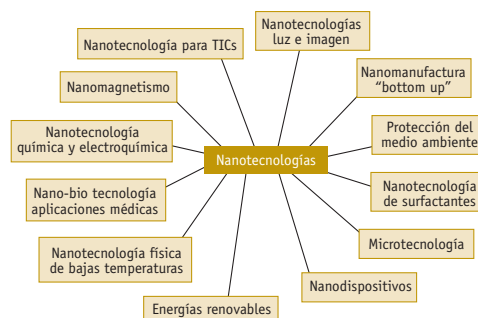
Si en fin de cuentas, la ciencia económica debiera ser una praxeología útil para el buen funcionamiento de la sociedad, es obvio que sin este nivel mesoeconómico intermedio que es fundamental para la observación y para la acción, no se conseguirá nunca llegar sensatamente de la teoría a la práctica.

Es pues en el nivel mesoeconómico que conviene contemplar el papel futuro de la nanotecnología, y lo haremos con referencia al análisis de interdependencia sectorial (Leontief), y a los ciclos de largo plazo (Schumpeter).

2. NANOTECNOLOGÍA Y ANÁLISIS INPUT-OUTPUT

La nanotecnología se refiere esencialmente a “técnicas y ciencias que estudian, manipulan y obtienen de manera controlada materiales, sustancias y dispositivos de dimensiones nanométricas” (Fundación Madri+d, 2005)

Cuadro 1



Fuente: EOI, 2006

La literatura describe un amplio campo de actuaciones de la nanotecnología que incluye investigaciones básicas (nanociencias), instrumentos para la actividad en el nivel nano (que se refiere a la mil millonésima parte de un metro), y materiales elaborados con estos instrumentos (nanomateriales)

Los productos de la nanotecnología se incorporan o se pueden incorporar en otros diseños productivos de la química, de la energía, del medioambiente, de la medicina, o pueden contribuir a la mejora de productos y procesos muy diversos en tratamientos de superficies, magnetismo u otras propiedades. Es así como ya se incorporan nanotubos en raquetas de tenis, nanopartículas u nanofilms en gafas de sol y antiniebla, materiales nanocompuestos en moldeados para coches. La incipiente penetración de la nanotecnología se hace invisible en objetos que habitan nuestra vida cotidiana, como algunas cremas faciales o tejidos que respiran en condiciones extremas.

La visión que hoy tenemos de la nanotecnología es la de una actividad productora de bienes intermedios que se localiza en una industria radicalmente nueva.

La distinción que introduce Leontief entre bienes intermedios (que sirven a producir otros bienes) y bienes finales (cuya vida concluye formalmente con el consumo humano) sirve aquí para separar a la nanotecnología de otros procesos tecnológicos que como las infotecnologías o las biotecnologías tienen vocaciones importantes en el campo del consumo final: los ordenadores y la mayoría de los *softwares*, los productos biogenéticos de la farmacia, son bienes que apelan por derecho propio al consumidor.

Los productos de las nanotecnologías marcan diferencias cualitativas de otros productos, afectan sus costes de producción, pero, por el momento, no tienen vida propia en los mercados de consumo. Conceptualmente son productos intermedios: no podemos como consumidores finales comprar y vender lo invisible.

En el modelo *input-output* de Leontief (Pulido, Fontela 1993), la aparición de la nanotecnología corresponde al nacimiento de una nueva fila y columna en la matriz que refleja las interdependencias sectoriales de la economía. La fila, en la que se miden los inputs que un sector *i* proporciona a los otros sectores *j* es especialmente significativa en el caso de

la nanotecnología. Los llamados coeficientes técnicos de Leontief (coeficientes a_{ij} que indican la cantidad de i por unidad de j) son para la fila de la nanotecnología una indicación de lo que podría aportar el *output* de esta tecnología a la producción de cada sector económico.

Por el momento esos coeficientes deben ser insignificantes, pero todo apunta a que dentro de pocos años tendrán una relevante importancia en el cambio estructural de nuestra economía.

El proceso que cabe esperar del crecimiento de los coeficientes de *input* de las nanotecnologías tiene dos características que pueden ser complementarias:

- Por un lado se observará necesariamente un movimiento de sustitución por el que nanoproductos reemplazarán a productos ya tradicionales en los sectores utilizadores; la experiencia del cambio histórico de coeficientes de *input* cuando aparecen nuevas tecnologías señala, que inicialmente los cambios se producirán en sectores utilizadores muy dinámicos.
- Por otro lado, se observará un proceso de desarrollo intrínseco, sin aparente sustitución, debido a la aportación que la nanotecnología puede hacer a la "calidad" de productos tradicionales (como se ha visto en los ejemplos ya mencionados de las raquetas de tenis o de las gafas de sol); en estos procesos el producto de la nanotecnología interviene como un aditivo.

¿Qué sabemos en estos momentos sobre el proceso de sustitución? Esencialmente que depende de los precios relativos: los materiales plásticos han desarrollado su capacidad de sustituir a la madera o a numerosos materiales metálicos cuando sus precios relativos han llegado a niveles que justificaban las inversiones necesarias para los cambios de diseño.

Por el momento, como es normal con toda innovación tecnológica de carácter radical, los precios de los productos de la nanotecnologías son elevados, ya que tienen que absorber tanto la escasa eficiencia de la producción "a la medida", como la amortización de ingentes costes acumulados de I+D (aunque la intervención pública directa o indirecta, en casos como el de Estados Unidos en los que juegan un papel esencial los gastos de la investigación militar, haya reducido sensiblemente el volumen necesario de

inversión privada en I+D) Pero es de esperar que con adecuadas economías de escala (se contemplan producciones de nanotubos en Japón que ya se cifran por centenares de toneladas), los costes y los precios de los productos nanotecnológicos disminuirán vertiginosamente (véase, por ejemplo, la llamada ley de Moore de los transistores que estimó con éxito la caída de los costes de producción de los componentes electrónicos).

El trasfondo de la sustitución de materiales tradicionales por nuevos nanomateriales es aleccionador, ya que hace inmediata referencia a las restricciones impuestas por los recursos no renovables o escasamente renovables de nuestro planeta.

Aunque a veces parezca un contexto de ciencia-ficción, es evidente que la filosofía nanotecnológica de reconstrucción de la naturaleza desde sus bases atómicas, parece destinada (obviamente a muy largo plazo) a desplazar los límites de la capacidad de autosuficiencia humana en la Tierra.

¿Por dónde se iniciará la sustitución de materiales? Sin duda la fase inicial se refiere a nichos de mercado muy específicos en los que el fenómeno de sustitución se une al de la nueva aportación de características técnicas adicionales, lo que reduce el efecto restrictivo del elevado precio relativo.

Las sustituciones masivas en materiales tradicionales no se pueden vislumbrar por el momento; en el desarrollo de la función logística de todo nuevo mercado, la fase inicial es relativamente lenta y repleta de intentos con frecuencia fallidos.

En el caso de la nanotecnología esta fase inicial se complica por la ausencia del soporte que normalmente aportan los mercados de consumo final. En estos últimos intervienen fenómenos psicológicos que son capaces de permitir que se franquee la fase inicial de costes y de precios elevados, mediante fenómenos de moda que pueden identificar el nuevo producto con la modernidad e introducen una inelasticidad-precio independiente del nivel de renta de los consumidores.

El mercado del consumo intermedio cuenta con una demanda dictada por empresas que minimizan costes y maximizan beneficios; las empresas son menos propicias a tolerar precios elevados que no introduzcan elementos de diferenciación suficientes para su propia producción, o que no les permitan transferir al consumidor el aspecto hedónico de la innovación. Es así que se explica la estrategia de introducción

de nanotubos en raquetas de tenis que por ese mero hecho adquieren una características competitivas en la estructura decisional del jugador de tenis que modifican su proceso de maximización de utilidad.

Los procesos de sustitución de *inputs* y aportación de nuevas características a los productos ya existentes, son todavía incipientes, y los coeficientes técnicos a_{ij} de una hipotética matriz de Leontief que dispusiera de información suficiente para incorporarlos, son económicamente poco significativos. La perspectiva a muy largo plazo, con unidad de medida de siglos, sitúa por el contrario el nivel esperado de los coeficientes de la nanotecnología en un lugar central del sistema económico.

¿De que dependerá la transición, a parte del factor endógeno ya evocado de las economías de escala y de la disminución de los precios relativos de los productos nanotecnológicos? Esencialmente de la dinámica de crecimiento de las economías en su conjunto, y de los sectores utilizadores en particular.

Si sobre la dinámica macroeconómica hay poco que decir, pues afecta indiscriminadamente a todas las actividades económicas, sobre la dinámica sectorial si es importante reflexionar a la hora de definir una estrategia de desarrollo del sector de la nanotecnología.

Como ya indicamos en párrafos anteriores, es un hecho comprobado y lógico que los sectores que más innovan en sus procesos productivos son también los que más crecen y los que más invierten. El círculo virtuoso del crecimiento sectorial se produce porque cuando un sector crece mucho necesita mayor capacidad productiva, esto le obliga a invertir y le permite renovar su aparato productivo tecnológico, lo que a su vez facilita la innovación y la satisfacción de nuevas demandas en crecimiento.

Por ello, los estudios disponibles sobre la evolución de las matrices *input-output* de los países industriales avanzados muestran claramente que cuando se producen innovaciones en procesos que tienen que ver con un aumento de los coeficientes técnicos a_{ij} de una actividad i , estos se generalizan a todos los sectores utilizadores j , pero donde mayor es el aumento es en los sectores en los que el círculo virtuoso de la innovación estimula el crecimiento.

En este contexto es de suponer que en la fase inicial del desarrollo de la nanotecnología el sector que mejor tolerará el nuevo *input* es el de la electrónica, pieza fundamental en el desarrollo del paradigma tecnológico de la Sociedad de la Información; de ahí la importancia que hoy conviene atribuir a futuras actividades productivas en el campo de la nanoelectrónica.

En esta misma línea de razonamiento se inscriben las aplicaciones de las nanotecnologías que están empezando a dirigirse a los sectores del ocio y de la salud, dos sectores que tienen un componente elevado de servicios, que están en fuerte crecimiento, y que tienen la característica de proporcionar bienes “superiores” (bienes de especial interés cuando se han satisfecho las necesidades básicas de supervivencia y de razonable bienestar) En los bienes “superiores”, que absorben en buena parte las rentas discrecionales (rentas disponibles después de satisfacer las “obligaciones” de consumo más habituales), los efectos de elasticidad de la demanda al precio se atenúan, y la capacidad de absorción de procesos innovadores más caros aumenta, como ya hemos señalado con el ejemplo de las raquetas de tenis.

En definitiva, el diseño de la estrategia de desarrollo de la nanotecnología requiere un estudio detallado de las características evolutivas de los sectores utilizadores, y mucho más que en el caso de las innovaciones de productos finales de consumo, un enfoque multisectorial.

Un plan de futuro de la nanotecnología pasa por una prospectiva a largo plazo de la mesoeconomía de los países industriales avanzados.

3. NANOTECNOLOGÍA Y CICLOS LARGOS

Christopher Freeman (1984) y la escuela neo-schumpeteriana, así como la corriente investigadora que forma el “colegio invisible” de la economía de la innovación (Verspagen, Werker, 2003) han proporcionado evidencia empírica que establece la estrecha relación que existe entre las oleadas largas de crecimiento económico y la convergencia de trayectorias tecnológicas que encuentran su origen en diferentes disciplinas científicas.

También ha quedado suficientemente demostrado (Fontela, 1998) que cuando esta convergencia tecnológica se produce afecta prácticamente a todos los procesos y productos intermedios y finales, y se producen efectos sinérgicos y de apalancamiento ("Spillovers").

Si a finales del siglo XX el paradigma tecnológico de la Sociedad de la Información (ordenadores, telecomunicaciones, microelectrónica) ha iniciado una profunda transformación de la gran mayoría de los procesos productivos y de los bienes y servicios producidos, lo que ha contribuido poderosamente al desarrollo de la Nueva Economía (Fontela, 2000), el escenario de futuro, que hoy se entiende por la Sociedad del Conocimiento se sustenta en otras convergencias tecnológicas que ya se están empezando a detectar.

Después de un largo periodo histórico de segmentación y fomento de la autonomía de las disciplinas científicas, el siglo XXI parece empezar a caracterizarse por un cierto proceso de convergencia de numerosas disciplinas.

El caso más evidente es el de la llamada convergencia molecular o convergencia en el análisis de lo infinitamente pequeño, en la que están directamente implicados varios campos de investigación emergentes como el de las nanotecnologías y el de las biotecnologías. El acercamiento del análisis de la materia viva y de la materia inerte, de los genes y de los átomos, abre extraordinarias posibilidades, en particular cuando se asocia al desarrollo de las infotecnologías y de las ciencias cognitivas.

Los recientes informes de la Academia de Ciencias de los EE.UU (NSF, 2002), y de la Comisión Europea (CE, 2004) evocan la inmediatez de estos nuevos desarrollos multidisciplinares, y sus posibles implicaciones en términos de invenciones e innovaciones que pueden cambiar radicalmente las facultades humanas y los procesos sociales.

La capacidad que se está desarrollando para intervenir a nivel molecular adquiere especial relevancia para la Sociedad del Conocimiento, cuando se abordan temas de información y de conocimiento.

Es obvio que la convergencia de los desarrollos nano-bio-info, con los progresos de la investigación en el campo de las ciencias cognitivas (que cubre las neurociencias, al mismo tiempo que la psicología y la filosofía) es esencial para la

comprensión y la mejora de los procesos de adquisición, acumulación y utilización del conocimiento por los seres humanos.

Esta evolución hacia la convergencia científica en lo infinitamente pequeño es por tanto la piedra angular del desarrollo tecnológico de la Sociedad del Conocimiento

La potencialidad tecnológica evocada por la convergencia podrá proporcionar la base estructural de la Sociedad del Conocimiento, si encuentra una demanda apropiada, si responde a una necesidad valorada por la futura sociedad.

Los campos de aplicación posible de las tecnologías de la convergencia son muy variados, y definen algunas demandas a largo plazo que ya se empiezan a detectar:

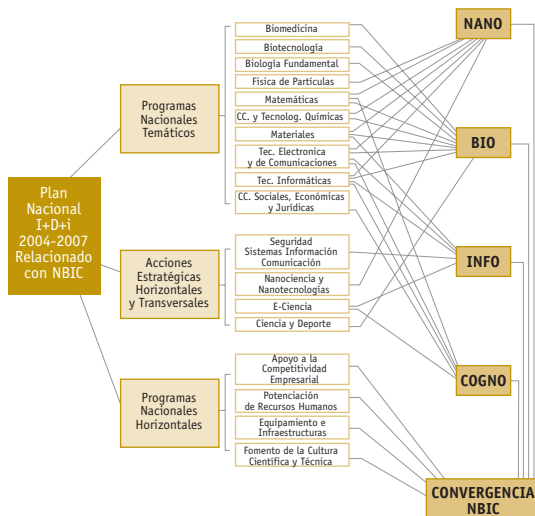
- En la industria, la tendencia a la miniaturización ha marcado el pasado reciente, y parece responder a la necesidad de reducir la demanda de materiales y de energía; extrapolada, esta tendencia justificaría el desarrollo de nano-manufacturas o de bio-ordenadores;
- en la sanidad, son numerosas las tendencias que como el aumento de la esperanza de vida, o la integración de la gestión personal de la salud en el estilo de vida, promueven una demanda de interpretación del papel de la genética o de procesos de regulación individual en los que necesariamente intervienen sistemas de información y elementos cognitivos;
- En modo muy similar, la demanda de conocimiento es una demanda de educación que se transmite también al desarrollo de las tecnologías de la convergencia nano-bio-info-cogno;
- La seguridad, el medioambiente, el transporte y la energía son algunos otros de los campos en los que el paso a una Sociedad del Conocimiento implica transformaciones de los sistemas socio-técnicos en cuya nueva composición deben poder intervenir las tecnologías de esta convergencia en el nivel de lo infinitamente pequeño.

Dos informes muy recientes (CSIC, 2005 y EOI, 2006) analizan específicamente el proceso de la convergencia nano-bio-info-cogno en España e identificar posibles líneas de investigación

que insten en la importancia como punto de partida de una actividad importante en nanotecnología.

El Plan Nacional de I+D+i ya ha empezado a reconocer de manera aún informal, la naturaleza de esta convergencia científica y tecnológica que prepara la Sociedad del Conocimiento, aunque es evidente que el fenómeno está todavía en todo el mundo en su fase inicial.

Cuadro 2. NBIC y Plan Nacional I+D+i



Fuente: Elaboración propia en base al examen del Plan Nacional de I+D+i 2004-2007

4. CONSIDERACIONES FINALES

La Sociedad del Conocimiento plantea importantes retos para la ciencia económica, ya que afecta los planteamientos fundamentales de la teoría del valor y de los precios. El “conocimiento” como vector de innovación, o sea de transformación de la información en riqueza, evoluciona en mercados imperfectos en los que los parámetros habituales de la maximización económica (de las utilidades, de las rentas, de los beneficios) se perciben con dificultad.

Pero es evidente, que la economía seguirá manteniendo su operatividad (ciertamente en términos diferentes) en el siglo XXI, y que esta economía condicionará y será condicionada por el cambio tecnológico.

En este nuevo contexto las políticas científicas y tecnológicas y en especial las políticas de gasto público en I+D han pasado a ocupar un papel estelar en el conjunto de las actuaciones públicas de creación de un marco adecuado para el desarrollo empresarial.

En el campo de la ciencia básica, su carácter de bien público no admite discusión, ya que los resultados de su desarrollo se difunden sin barreras a toda la comunidad científica mundial. A medida que la investigación científica se acerca de la tecnología, y esta de la innovación, los resultados son apropiables y por tanto la justificación económica de las políticas públicas es más discutible. Por el momento los países de la OCDE están abordando con gran pragmatismo este tema y en cierto sentido están desarrollando una competencia ente sistemas nacionales de apoyo a la innovación que, en general, van más allá de la simple producción de bienes públicos.

La creciente preocupación por la acumulación de retrasos en el desarrollo de las tecnologías de la información, y por el estancamiento relativo (en comparación con Estados Unidos) de la actividad económica y del empleo, han motivado una gran efervescencia estos últimos años en relación con el papel de la ciencia, de la tecnología y de la innovación en las políticas públicas.

En marzo 2000, en la Cumbre de Lisboa, la Unión Europea estableció como objetivo para 2010 ser “la economía del conocimiento más dinámica y competitiva del mundo, capaz de un desarrollo económico sostenible, con más y mejores empleos, con una mayor cohesión social y con respeto del medio ambiente”. Es la llamada “Estrategia de Lisboa”.

En 2006, a mitad de camino de la estrategia de Lisboa, las señales de alerta que provocaron la declaración de la Cumbre siguen en pie: el crecimiento europeo es lento, inferior al crecimiento mundial, la competitividad por precios se ve afectada por la elevada cotización del euro, y la balanza comercial de bienes de alta tecnología sigue siendo deficitaria.

Esta situación ha provocado una intensificación de la reflexión sobre la pertinencia de las políticas adoptadas y en especial de las políticas científicas y de apoyo al cambio tecnológico.

Las políticas europeas de ciencia y tecnología no parecen estar bien adaptadas a algunas características básicas de la

Sociedad del Conocimiento y de la nueva oleada de innovaciones del siglo XXI que identificamos con la convergencia nano-bio-info-cogno.

- La Sociedad del Conocimiento requiere el rediseño de los grandes sistemas socio-técnicos (sanidad, calidad ambiental, etc.), una transformación que tiene que apoyarse en una ciencia del diseño, de los sistemas complejos y de los procesos cognitivos individuales y sociales;
- La convergencia en la ciencia de lo infinitamente pequeño requiere infraestructuras y proyectos que aceleren la conexión entre disciplinas en el plano científico y el desarrollo de ingenierías de integración del conocimiento de estas disciplinas.

Estas dos características básicas del escenario a largo plazo que hoy contempla la sociedad europea, imponen transformaciones profundas de los sistemas de educación superior y de investigación destinados a aumentar la capacidad investigadora en temas complejos y multidisciplinarios.

La I+D es un sector productivo que absorbe un porcentaje creciente de la capacidad productiva de los países avanzados; es normal que este sector se vea obligado a desarrollarse de manera eficiente, y para ello es necesario que las tendencias naturales de su "oferta" correspondan perfectamente a las tendencias de su "demanda". Como el encuentro entre oferta y demanda tiene lugar en el ámbito de la innovación, la relación está vinculada al desarrollo de los sistemas socio-técnicos en los que la innovación establece su campo de cultivo.

Es en el diseño de los sistemas socio-técnicos que radica la principal responsabilidad de las políticas públicas. Es tarea de los gobiernos definir las características estructurales de los sistemas esenciales de la Sociedad del Conocimiento. Esta tarea requiere capacidad de anticipación, proactividad, visión prospectiva. Si la Sociedad del Conocimiento se concibe como un escenario normativo para el siglo XXI en Europa, se impone que las políticas de I+D consideren explícitamente las necesidades de la transformación de los sistemas socio-técnicos básicos con el apoyo del proceso de convergencia tecnológica que delimita el campo de las oportunidades. Europa necesita para la Sociedad del Conocimiento una Ciencia del Diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- CE, (2004), *Converging Technologies, Shaping the Future of European Societies*, http://europa.eu.int/comm./research/conferences/2004/nw/pdf/final_report_en.pdf
- EOI (2006) *El desafío de la convergencia de las nuevas tecnologías (Nano-Bio-Info-Cogno)*, EOI, Madrid.
- Freeman, C. (1984), *Long Waves in the World Economy*. Pinter, Londres.
- Fontela, E. (2000), *El empresario del siglo XXI*. Pirámide, Madrid.
- Fontela, E. (1997), *Los ciclos económicos en la economía moderna*. Biblioteca Nueva, Madrid.
- Fontela, E. (1998), *Enabling Macro Conditions for Realising Technology's Potential in 21st Century Technologies*. OECD, Paris.
- Fundación Madri+d (2005), Sánchez, J. "Nano: Nanotecnología en España". Comunidad de Madrid. Madrid.
- Leontief, W., (1951), *The Structure of the American Economy, 1919-1939*, Second Edition. Oxford University Press, New York.
- NSF, (2002), *Converging Technologies for Improving Human Performance*, National Science Foundation, <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/>
- Pulido, A., Fontela, E. (1993) *Análisis input-output, modelos, datos, aplicaciones*. Pirámide, Madrid.
- Schumpeter, J.A. (1939), *Business Cycles*, Cambridge MA, Ballinger.
- Stone, R. (1980), *Political Economy, Economics and Beyond. The Economic Journal*, 90, p 719-736.
- NSF, (2002), *Converging Technologies for Improving Human Performance*, National Science Foundation, <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/>

Nanotecnología en España

Jaime Sánchez Páramo

Joaquín Alonso Andaluz

Fundación para el Conocimiento Madri+d

resumen

Las nanociencias y las nanotecnologías son nuevas áreas de investigación y desarrollo (I+D) cuyo objetivo es el control del comportamiento y la estructura fundamental de la materia a nivel atómico y molecular. Estas disciplinas abren las puertas a la comprensión de nuevos fenómenos y al descubrimiento de nuevas propiedades susceptibles de ser utilizables a escala macroscópica y microscópica. Las aplicaciones de las nanotecnologías son cada vez más visibles y su impacto se dejará sentir pronto en la vida cotidiana. Este artículo sintetiza las principales conclusiones alcanzadas en el estudio "Nanotecnología en España". Un informe que describe, analiza y estudia la situación actual de la nanotecnología en España.

palabras clave

Nanotecnología
Nanociencia
Vigilancia Tecnológica
España
Investigación
Desarrollo e innovación

abstract

Nanosciences and nanotechnologies are new research and development areas whose objective is to control the matter behavior and fundamental structure at an atomic and molecular level. These disciplines open the doors to the comprehension of new phenomena and to the discovery of new properties that may be used either at a macroscopic or a microscopic scale. The nanotechnologies applications are more and more visible every year and their impact will soon reflect in our way of life. This paper synthesizes the main conclusions of the report "Nanotechnology in Spain", where the situation of nanotechnologies in Spain is described, analyzed and studied.

keywords

*Nanotechnology
Nanoscience
Technology Watch
Spain
Research
Development and innovation*

1. OBJETIVO DEL ARTÍCULO.

El presente artículo extracta los aspectos más relevantes del estudio de vigilancia tecnológica “Nanotecnología en España”, realizado con la colaboración del Círculo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología (gestionado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial y la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid) y que esta co-financiado por dicha Dirección General y el Proyecto Europeo Nanomat (VI PM – SSA-508695).

En dicho estudio, de más de 6000 páginas, se describe, analiza y estudia la situación actual de la nanotecnología en España, desde las líneas de investigación en nuestro país, hasta las tecnologías que comienzan a desarrollarse a nivel industrial, pasando por conocer los centros, las empresas, las instituciones, los investigadores y demás actores involucrados.

El estudio de la “Nanotecnología en España” persigue tres objetivos, de los que se dan algunas pinceladas en este artículo:

- En primer lugar, identificar las líneas temáticas y la actividad de I+D+i en el país, en el área de la nanotecnología, bien sea dentro del mundo académico como del campo industrial, empresarial e institucional.
- En segundo lugar, detectar a todos los actores involucrados a nivel nacional en nanotecnología (Expertos, Centros de Investigación, Universidades, Inventores, Empresas, Instituciones...) gracias a las trazas dejadas por su actividad en el campo, por incipientes y poco intensas que estas sean.
- Y, por último, el desarrollo de herramientas de análisis y comparación, así como de indicadores que permitan describir el estado de la cuestión y monitorizar su evolución posterior en el tiempo.

El Nanoindex

La nanotecnología ha acaparado durante los últimos años un interés creciente debido a las prometedoras previsiones de futuro en cuanto a sus posibilidades y aplicaciones en un amplio rango de disciplinas. Precisamente, es en este carácter multidisciplinar dónde radica una de las dificultades a la hora de trabajar y estudiar el amplio campo de la nanotecnología. Cuando se recaba información, se consulta un artículo, una base de datos o, simplemente se habla de nanotecnología, nos encontramos con que los expertos que trabajan en ésta desde las disciplinas (Medicina, Física, Ingeniería, etc.), han desarrollado su propia visión de lo que es la nanotecnología.

Este hecho supone una dificultad a la hora de obtener una visión multidisciplinar y global de la nanotecnología ya que, por un lado resulta difícil combinar los distintos puntos de vista existentes hasta el momento, al tratarse de descripciones parciales y sesgadas, y por otro, la existencia de clasificaciones y estructuras distintas según la fuente de información consultada, hace difícil la comparación y el análisis de la información y los conocimientos obtenidos de las distintas fuentes. Por estas razones, desde el Círculo de Innovación de Microsistemas y Nanotecnología (CIMN), se ha desarrollado una clasificación multidisciplinar y global de la nanotecnología.

A esta estructura temática se la ha denominado como **Nanoindex** y permite clasificar cada información, artículo, congreso, es decir, cada actividad llevada a cabo en el campo de la nanotecnología, por una serie de códigos que la describen, independientemente de la disciplina de la que proceda. El Nanoindex está estructurado en nueve secciones: A a I (tabla 2), que corresponden a distintos criterios de clasificación y cuyos códigos se encuentran estructurados en cinco niveles de profundidad, cada uno de los cuales aporta un mayor grado de detalle y concreción respecto a su predecesor:

Tabla 1. Listado de las secciones del Nanoindex dónde se indica el número de sub-niveles de cada una de ellas.

Código	Sección	# sub-niveles
A	Nanociencia y aspectos fundamentales de la nanotecnología	3
B	Nanoestructuras y nanoelementos	3
C	Nanotecnología para aplicaciones estructurales	3
D	Nanotecnología para tecnologías de la información y las comunicaciones	4
E	Nanotecnología y química	1
F	Nanomedicina, nanobiotecnología y agroalimentación	4
G	Nanosensores y nanoactuadores	3
H	Caracterización y fabricación	4
I	Aplicaciones industriales de la nanotecnología	3

De esta forma, cada uno de los objetos, informaciones, autores... que se clasifican con el Nanoindex queda descrito, al menos, por tres códigos: uno de acuerdo a su estructura (B), otro de acuerdo a su fenomenología (C-G) y otro según los procesos de caracterización y/o fabricación empleados (H). No obstante, tres códigos es un mínimo, pudiendo clasificarse el objeto de trabajo con tantos códigos como sea necesario para su correcta descripción.

2. NANOTECNOLOGÍA EN ESPAÑA

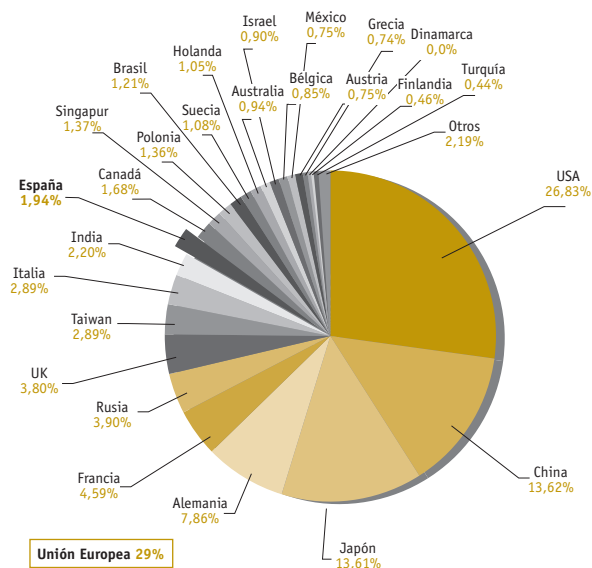
Marco de referencia: La nanotecnología en el mundo.

La nanotecnología es una disciplina emergente, relativamente reciente, en la que se ha empezado a trabajar intensamente desde comienzos de los años 90. Actualmente se producen más de 30000 trabajos sobre nanotecnología anualmente en todo el mundo.

Del análisis de las publicaciones recogidas se deduce que la nanotecnología se encuentra, a escala mundial, en una etapa en la que los esfuerzos se centran en la obtención de nuevos materiales, la fabricación de dispositivos, el estudio práctico de nuevos fenómenos, la comprobación y aprovechamiento de las predicciones teóricas y el desarrollo de aplicaciones. Es por esta razón, que la mayor parte de trabajos publicados tiene un carácter experimental (~ 60% de los trabajos analizados).

La información recabada en la base de datos INSPEC para el periodo 2003-2004 proporciona una instantánea del trabajo de I+D en nanotecnología que se está desarrollando actualmente a nivel mundial.

Figura 2. Distribución por países de las publicaciones y actas de congresos sobre nanotecnología, encontradas en INSPEC para el período 2003-2004



En la figura 2 se ha representado el porcentaje del total de publicaciones científicas en nanotecnología encontradas, correspondientes a cada país. España ocupa la decimoprimer posición, con un 1,94 % de las publicaciones, de las producidas en todo el mundo (de acuerdo con la base de datos INSPEC). En las primeras posiciones, se encuentran los países con una mayor tradición científica y tecnológica, como Estados Unidos, Japón y Alemania. Dichos países no sólo dominan el campo de la nanotecnología, si no que se trata de las primeras potencias mundiales en ciencia en general. El interés suscitado por esta nueva disciplina, ha impulsado a los líderes mundiales a incorporarla, rápidamente, en sus planes de trabajo, extendiendo su liderazgo mundial también a este ámbito emergente.

Igualmente, entre los países más productivos en nanotecnología, se encuentran potencias como China e India, con economías, a priori, más modestas que la americana o la europea. Las grandes expectativas levantadas por la nanotecnología han impulsado a estos países a realizar un esfuerzo por no "perder el tren" de esta disciplina, con el retraso científico, tecnológico, industrial y económico que ello supondría.

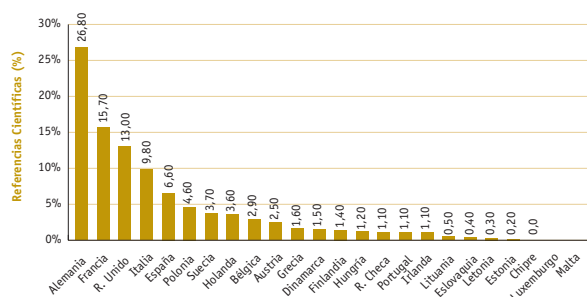
En el caso de China, el trabajo de la comunidad científica se ha centrado en áreas específicas de la nanotecnología como, por ejemplo, los nanotubos de carbono. India, sin embargo, ha aprovechado la formación recibida por muchos de sus científicos en el extranjero, para impulsar una actividad investigadora creciente en todas las disciplinas y, particularmente, en nanotecnología.

La producción científica en nanotecnología de la Unión Europea en su conjunto, es ligeramente superior a la de EE.UU. (29% frente a 26,83 %), colocándose como la primera potencia mundial en este campo. Este dato refleja el impulso que la nanotecnología está recibiendo en Europa, especialmente en países como Alemania, Gran Bretaña, Francia, Italia e Irlanda. Además, la U.E. está realizando un gran esfuerzo con el objetivo de convertirse en la primera potencia mundial basada en el conocimiento, en un plazo de diez años, lo que la ha llevado a impulsar desde sus inicios, la nanotecnología (Estrategia de Lisboa). Si bien es cierto, que no todos los miembros de la Unión Europea han respondido con el mismo interés a las directrices y al impulso dado por las autoridades comunitarias.

La figura 3 muestra la distribución de las publicaciones científicas sobre nanotecnología en los países de la U.E.

Alemania produce más de un cuarto de las publicaciones en nanotecnología de la Unión; diez países miembros acaparan casi el 90%, mientras que el 10% restante se reparte entre los otros 15 socios.

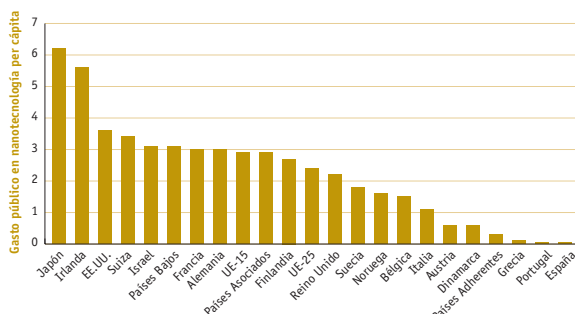
Figura 3. Distribución en los países de la Unión Europea del porcentaje de publicaciones científicas sobre nanotecnología (INSPEC 2003-2004)



Los países del Este, recientemente incorporados a la UE, ocupan las últimas posiciones, mientras que, con Alemania a la cabeza, Francia, Reino Unido, Italia y España se sitúan en los primeros lugares. No obstante, el reparto es muy desigual, y si bien es cierto que España ocupa la quinta posición, su producción científica es 20 puntos inferior a la de Alemania (Alemania, Francia e Inglaterra cuentan con más de la mitad de las publicaciones científicas europeas en nanotecnología).

Estos datos resultan sorprendentes si tenemos en cuenta la información sobre financiación pública per cápita dedicada a nanotecnología, expuesta en la figura 4.

Figura 4. Comparación de la financiación en nanotecnologías entre la UE-15, la UE-25, algunos países adherentes (CZ, LV, Lt, SI), los principales países asociados al 6º Programa Marco (CH, IL y NO), EE.UU. y Japón, sobre la base per cápita en el año 2003. Cambio considerado 1€~1\$



Fuente: Comisión de la Comunidad Europea, Mayo 2004

España, de acuerdo con los datos de la Comisión Europea, se encuentra entre los países que menos financiación pública per cápita dedica a la investigación y desarrollo en nanotecnología, con niveles similares a Portugal y Grecia, e inferiores a 0,05 €/habitante. No obstante, a pesar de la escasa financiación pública y de acuerdo con los datos recogidos de Inspec, España se encuentra entre los 5 países que más trabajos científicos publican en el campo de la nanotecnología en Europa y entre los 12 que más publican sobre el tema a nivel mundial. Estos datos indican que la formación y conocimientos de la comunidad científica española se encuentran en situación de competir a nivel mundial y parecen indicar que los factores limitantes del desarrollo nanotecnológico en España radican en la falta de financiación, tanto pública como privada, y en la transferencia de conocimientos generados desde los centros de investigación a la industria, para su aprovechamiento en el desarrollo de productos de base tecnológica.

Líneas y Tendencias

Expresiones de interés del VI Programa Marco

Se han analizado las expresiones de interés del VI Programa Marco originadas en España en el campo de la nanotecnología. Se observa que los aspectos de la nanotecnología que suscitaron un mayor interés fueron: las aplicaciones industriales (I), la fabricación y caracterización (H), los nanoelementos y nanoestructuras (B) y los procesos químicos (E).

El estudio revela no obstante, que no todas las aplicaciones industriales de la nanotecnología inspiraron el mismo interés. Mientras que éste fue grande en biotecnología (I03), aplicaciones médicas y farmacéuticas (I04), tecnologías de las comunicaciones e informática (I1) y medio ambiente (I12), no se han encontrado EoIs, en campos tan relevantes como la industria textil (I06) o los procesos de producción (I17).

La situación es análoga en el caso de los nanoelementos y nanoestructuras (B). La mayor parte de las expresiones de interés se concentran en las áreas de los nanocomposites (B10) y las nanopartículas y los nanoagregados (B01). En contraposición, otro tipo de estructuras como las nanoestructuras semiconductoras (B04, B05, B06) o los materiales porosos (B12), apenas dieron lugar a EoIs.

Proyectos europeos

La base de datos de Cordis, ha permitido recabar y obtener información completa acerca de los proyectos de investigación con participación española financiados por la Comisión Europea en el campo de la nanotecnología.

Al igual que se hizo con las expresiones de interés, los proyectos encontrados han sido clasificados usando el Nanoindex.

Como sucedía en el caso de las expresiones de interés en nanotecnología, las categorías: aplicaciones industriales (I), fabricación y caracterización (H), nanoelementos y nanoestructuras (B) y procesos de información y comunicaciones (D), concentran un mayor número de proyectos. Sin embargo, a diferencia de las EoIs, son los nanoelementos y nanoestructuras y no las aplicaciones industriales, las que han dado lugar a un mayor número de proyectos de investigación.

Esta disparidad entre lo que suscitó interés al inicio del VI Programa Marco (EoIs) y lo que posteriormente se ha realizado (proyectos de investigación) podría justificarse mediante dos razonamientos distintos.

Por un lado, se puede considerar que una mayor concienciación por parte de la comunidad científica, de la importancia de que los avances científicos y tecnológicos se reflejen en una mejora de la calidad de vida de los ciudadanos y generen bienestar y riqueza, es decir, en los aspectos aplicados de las investigaciones llevadas a cabo, habría dado lugar a que, a la hora de expresar aquello en lo que querían trabajar (EoIs), los investigadores habrían hecho un mayor hincapié en los aspectos más aplicados de sus investigaciones. Posteriormente, a la hora de llevar sus ideas a la práctica, no siempre habría sido posible alcanzar los objetivos más aplicados, bien porque el estado de la ciencia no estaba lo suficientemente avanzado, bien por tratarse de objetivos demasiado ambiciosos o, simplemente, por no haber ganado el proyecto. Produciéndose de esta forma la disparidad observada.

Las discrepancias observadas entre las EoIs recogidas y los proyectos desarrollados están motivadas, junto con las causas anteriormente expuestas y sin duda en menor medida, por la necesidad de los investigadores de promocionar su trabajo.

Conscientes de la importancia de resaltar los aspectos aplicados de sus investigaciones a la hora de conseguir financiación, especialmente la europea, habrían hecho hincapié, al inicio del VI Programa Marco, en las aplicaciones industriales de aquello que les gustaría hacer (EoIs). Sin embargo, sabedores de que la nanotecnología es una disciplina aún joven y, en algunos campos, demasiado alejada de las aplicaciones comerciales, la puesta en práctica de sus ideas habría resultado más realista, quedando, por tanto, alejada del desarrollo de productos comerciales y aplicaciones industriales.

También existen coincidencias entre el interés expresado y las investigaciones realizadas en las áreas relacionadas con los nanocomposites (B10), los nanoagregados y las nanopartículas (B01) y los métodos para obtener (H02), estudiar y analizar nanomateriales (H01). Estas áreas dieron lugar a un gran número de expresiones de interés y han sido a su vez, objeto de numerosos proyectos de investigación.

Investigación, desarrollo e innovación en nanotecnología en España

Con el fin de conocer la situación de la I+D+i en nanotecnología en España, desarrollada tanto en el sector público: universidades, centros de investigación..., como en el privado: empresas, asociaciones industriales, centros tecnológicos..., se ha recogido información sobre los proyectos de investigación desarrollados por investigadores españoles, las patentes licenciadas con participación española y las publicaciones científicas con participación española.

Proyectos de I+D

Debido a las limitaciones impuestas por las fuentes de información existentes en España, sólo ha sido posible recabar información de manera sistemática, completa y organizada sobre los proyectos de investigación desarrollados en España, en nanotecnología, con financiación europea.

No obstante, también se ha recabado abundante información sobre los proyectos en nanotecnología, con financiación nacional y/o regional, si bien la cobertura del territorio nacional ha resultado muy desigual.

Los resultados referidos a la investigación con financiación de ámbito nacional, deben ser tomados con cautela. Si bien es

cierto que se han encontrado más de 200 proyectos de investigación, la distribución geográfica, la cobertura temática y la cobertura de las distintas entidades financiadoras, es muy heterogénea.

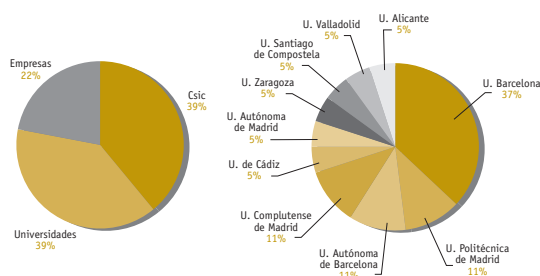
De esta forma, se ha recabado una gran cantidad de información referente a Madrid y Barcelona, debido en gran medida a la existencia de bases de datos en estas regiones. Sin embargo, la cobertura de áreas como Andalucía, Castilla León y Asturias, ha sido mucho menor, bien por la carencia de bases de datos de carácter autonómico o nacional con información de dichas regiones, bien por nuestro desconocimiento institucional de dichas áreas.

Por este motivo, las siguientes figuras hacen referencia, únicamente, a los proyectos en nanotecnología con financiación europea, de los que se ha podido recabar una información completa y organizada, que ha proporcionado una imagen más fidedigna de la situación actual.

- Proyectos Europeos dirigidos por un grupo español

La figura 5 muestra los proyectos europeos de nanotecnología coordinados desde España, según hayan sido dirigidos desde las universidades, las empresas o el CSIC. Se observa que la responsabilidad de coordinación se reparte equitativamente entre el CSIC y las universidades, mientras que el número de proyectos coordinados desde el sector privado, es sensiblemente menor.

Figura 5. Porcentaje de los proyectos europeos en el campo de la nanotecnología, coordinados desde España, dirigidos desde el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, las universidades o las empresas españolas. En la parte de la derecha se ha detallado el porcentaje de proyectos europeos coordinados desde las distintas universidades españolas



Si se comparan estos datos con los obtenidos para los proyectos europeos en nanotecnología, con participación

española y coordinadores extranjeros (empresas 27%, institutos de investigación 38%, universidades 35 %), se observa que las tendencias son muy similares, si bien es cierto que, en el resto de la Unión Europea, existe un mayor número de coordinadores en el ámbito empresarial.

- Proyectos Europeos con participación española

La figura 6 muestra los proyectos europeos en nanotecnología según la clase de entidad española participante. En la parte inferior se detalla la situación entre las universidades españolas. De las cinco universidades con un mayor número de proyectos europeos en nanotecnología, cuatro de ellas se encuentran entre las cinco que obtuvieron un mayor retorno del Programa Marco: Universidad de Barcelona (10,62%), la Politécnica de Cataluña (9,98%), la Complutense de Madrid (6,50%), la Autónoma de Barcelona (5,07%) y la Politécnica de Valencia (4,91%), de acuerdo con la noticia publicada por el periódico *El Mundo* el pasado mes de Mayo.

Figura 6. Porcentaje de los proyectos europeos en nanotecnología, con participación española en los que toman parte el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, las universidades, las empresas, los centros tecnológicos y otras entidades españolas. En la parte inferior, se ha detallado la situación entre las universidades españolas

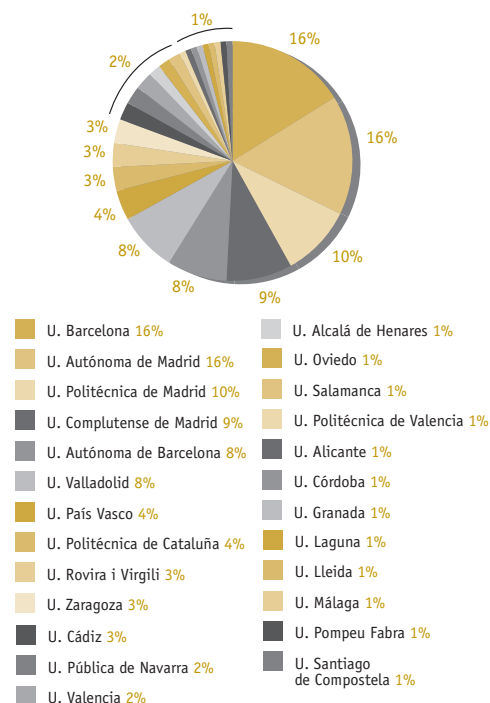
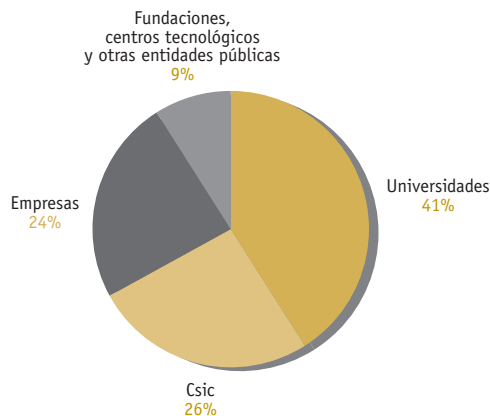


Figura 6b. Distribución de los proyectos de I+D entre las entidades españolas



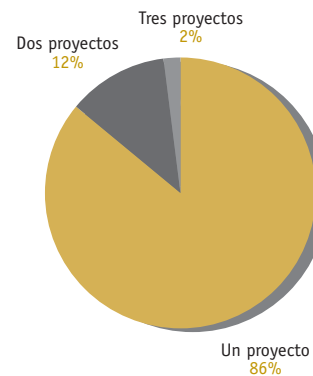
De los datos utilizados para la elaboración de las figuras 5 y 6 se concluye que la que participa o ha participado en algún proyecto de investigación europeo en nanotecnología, nunca ha asumido el papel de coordinador. Como ejemplo sirva el hecho de que tan sólo diez universidades de las veinticinco que han participado en algún proyecto europeo en nanotecnología, han ejercido de coordinadores y, según nuestros datos, ninguno de los centros tecnológicos que ha participado en proyectos sobre nanotecnología, lo ha hecho como coordinador.

Estos datos se ven reforzados por el hecho de que España coordina, únicamente, el 22% de los proyectos europeos en nanotecnología en los que participa (datos del CDTI, diciembre 2004).

De esta manera, la participación española se limita en numerosas ocasiones, a propuestas preparadas y coordinadas por entidades e instituciones extranjeras, lo que produce que estas no siempre se ajusten de manera idónea a sus objetivos e intereses.

En la figura 7 se muestra el porcentaje de empresas españolas que han participado en uno, dos o tres proyectos de investigación europeos en el ámbito de la nanotecnología. Casi el 90% de las empresas que han participado en algún proyecto, lo han hecho en sólo una ocasión.

Figura 7. Porcentaje de empresas españolas que han participado en uno, dos o tres proyectos en el ámbito de la nanotecnología



Se trata, sin duda alguna, de un hecho preocupante, ya que, o bien la trayectoria investigadora e innovadora en nanotecnología de la empresa es demasiado corta, como para haber participado en más de un proyecto, o bien su experiencia no les ha animado a tomar parte en una segunda ocasión.

El primero de los casos, refleja una incorporación tardía por parte de las empresas españolas, al campo de la nanotecnología, en el que se trabaja con intensidad desde hace, al menos, una década. Dado que la duración media de un proyecto europeo es de 3 años, una empresa activa en I+D+i en nanotecnología, ha dispuesto de tiempo suficiente para involucrarse en varios proyectos sucesivos, dando continuidad a su actividad innovadora en Europa.

El segundo caso, quizás podría ser explicado bien por una falta de incentivos para la participación empresarial, bien por la falta de una mentalidad innovadora y emprendedora entre el tejido industrial español. Habría que analizar con más detenimiento la situación para determinar, objetivamente, si la industria española se encuentra en alguna de estas dos situaciones.

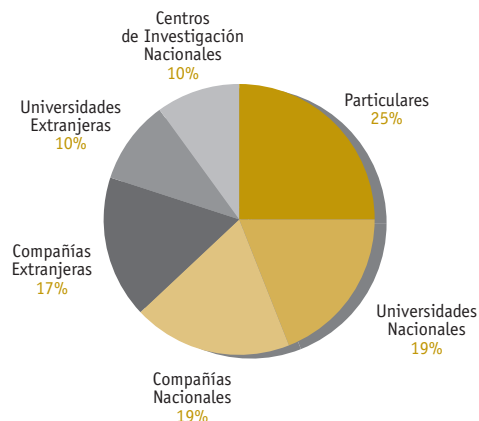
Patentes en el ámbito de la nanotecnología

El análisis de las patentes en el campo de la nanotecnología con participación española encontradas en la base Europea de Patentes (Espacenet) y la Oficina Americana de Patentes y

Marcas (USTPO), permite obtener información sobre la actividad en esta área a nivel industrial en España.

La figura 8 muestra los tipos de solicitantes encontrados y el porcentaje de patentes en nanotecnología, para cada una de las categorías. Es frecuente encontrar patentes licenciadas por centros o empresas extranjeras en las que, al menos, uno de los inventores trabaje en España, debido a colaboraciones entre entidades españolas y extranjeras. La situación inversa, sin embargo, se da con menor frecuencia.

Figura 8. Porcentaje de patentes en nanotecnología según el tipo de solicitante (búsquedas realizadas en USTPO y ESPACENET)



En el ámbito nacional, las universidades y las empresas privadas patentan sus invenciones en nanotecnología, en igual medida, copando cada una de ellas el 19% de las patentes encontradas. Este hecho resulta inusual en otras disciplinas, en las que los centros de investigación registran un número de patentes muy inferior al del sector privado.

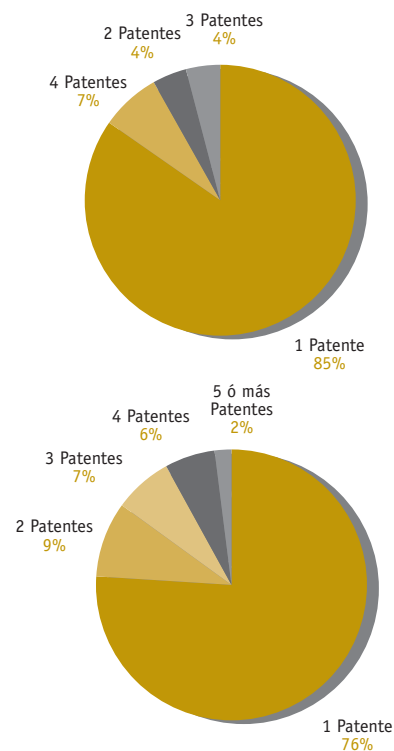
El tratarse de una disciplina reciente, que se encuentra todavía en una fase de investigación poco aplicada, podría explicar el menor número de patentes licenciadas por las empresas españolas hasta el momento. Mientras que, por otro lado, las prometedoras expectativas que la nanotecnología ha levantado en torno a sus futuras aplicaciones en todos los ámbitos de la ciencia y la tecnología, podrían estar animando a la comunidad investigadora, a registrar sus progresos en forma de patentes. La combinación de ambos factores, proporciona una explicación plausible para la infrecuente

paridad en la actividad "patentadora" de los centros de investigación y las empresas.

Igualmente sorprendente, resulta que el 25% de las patentes encontradas son solicitudes de particulares. En algunos casos, puede tratarse de una mera estrategia empresarial, para ocultar las líneas estratégicas seguidas. De esta forma, las invenciones realizadas se ocultan bajo el nombre de solicitantes particulares, resultando difícil rastrear la entidad empresarial que ejecuta o patrocina el trabajo.

La figura 9 muestra la proporción de solicitantes (parte superior) y de inventores (parte inferior) con 1, 2, 3, 4 ó 5 ó más patentes en nanotecnología.

Figura 9. Porcentaje de solicitantes (parte superior) y de inventores (parte inferior) con 1, 2, 3, 4 o 5 ó más patentes en el ámbito de la nanotecnología



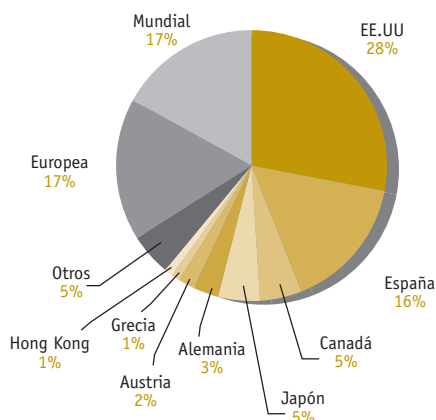
Se observa que más de 3/4 partes de los solicitantes e inventores han participado tan sólo en una patente. Como se ha repetido en varias ocasiones, la nanotecnología es una disciplina emergente, que aún no se encuentra madura, y en

la que se están dando los primeros pasos a nivel práctico y aplicado, lo que quizás justifique el bajo número de patentes por solicitante y/o inventor. Además, muchas de las medianas y pequeñas empresas activas en nanotecnología, optan por seguir una política de “secreto industrial” en lugar de patentar sus invenciones. A esta tendencia contribuye el alto coste que acarrea patentar y, en nuestro país en particular, la escasa tradición a este respecto (es, sin duda alguna, nuestro indicador de I+D más deficitario)

La figura 10 muestra las zonas geográficas y países en los que se han solicitado franquicias de las patentes en nanotecnología con participación española. Una patente otorga al solicitante el derecho de explotación en monopolio, de una invención durante un período limitado de tiempo. Por este motivo, las regiones y países donde una empresa licencia una patente, son un reflejo de los mercados en los que prevé explotar su invención y, por tanto, que resultan de interés comercial para dicha empresa.

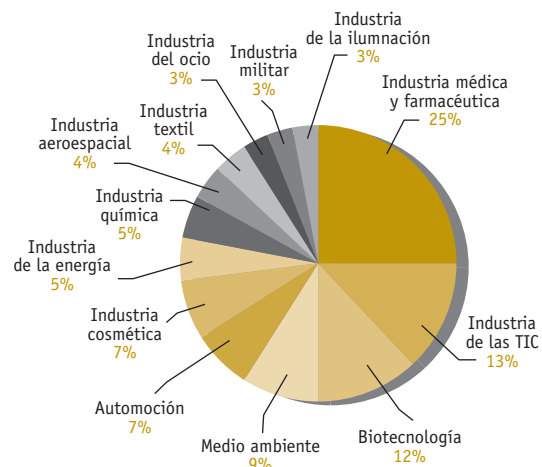
De acuerdo a la figura 10, los cuatro mercados de mayor interés para las empresas y los inventores españoles son: EE.UU., Europa, España y el dominio global de las patentes. El porcentaje de franquicias en Estado Unidos se encuentra sobre dimensionado por el hecho de que, como se ha explicado antes, se han encontrado varias patentes resultado de colaboraciones entre inventores españoles y empresas americanas, siempre más interesadas en su mercado local que en el español o, incluso, el europeo.

Figura 10. Países y zonas geográficas, en los que se ha solicitado una franquicia de las patentes en Nanotecnología con participación española



La figura 11 muestra la clasificación de las patentes en nanotecnología, con participación española, de acuerdo a los apartados de la categoría I del Nanoindex, es decir, en función de sus aplicaciones industriales.

Figura 11. Aplicaciones industriales de las patentes en Nanotecnología con participación española (códigos I del Nanoindex)



Sobresalen las aplicaciones en la industria médica y farmacéutica, entre las que se han encontrado numerosas patentes sobre métodos de obtención de nanopartículas y otros nanoelementos aplicables a la distribución y aplicación de medicamentos, así como en nuevos métodos de diagnóstico.

Los actores de la nanotecnología en España

En esta sección se presentan los grupos de investigación, las empresas, las instituciones públicas, los centros tecnológicos... que han demostrado alguna actividad en el campo de la nanotecnología. Para ello, se ha considerado la información obtenida tanto en las bases de datos de proyectos de investigación, como en las bases de datos de patentes, las referencias bibliográficas de carácter científico, la información obtenida de las distintas redes de I+D que trabajan en el marco de la nanotecnología y un largo etcétera.

Tan relevante a la hora de plasmar la situación Española en nanotecnología, como conocer el estado de la ciencia y la técnica en el campo, es determinar quienes son los investigadores, tecnólogos y demás actores involucrados, que poseen el conocimiento, los medios y la iniciativa.

Los resultados de esta sección se han organizado en tres apartados. En primer lugar se presentan las instituciones de carácter público que han demostrado actividad en nanotecnología. El segundo apartado se dedica a los grupos de investigación, bien sea en el sector público o privado, que trabajan en nanotecnología y, por último, el tercer apartado presenta los resultados referentes a las empresas españolas activas en nanotecnología.

Instituciones de I+D

La figura 12 muestra un mapa y una tabla en los que se representa la distribución geográfica (por provincias y comunidades autónomas) de las instituciones españolas encontradas que desarrollan alguna actividad en nanotecnología.

Se observa que se han encontrado instituciones en España, distribuidas por la práctica totalidad del país. Si bien es cierto que algunos casos la actividad nanotecnológica detectada era muy incipiente, se puede afirmar a la vista de los datos, que la nanotecnología ha suscitado interés en la mayor parte de las provincias españolas. Las comunidades científicas de las distintas regiones se han ido incorporando a esta disciplina emergente, con mayor o menor retraso, pero de forma que en la actualidad apenas existen en España, centros de investigación ajenos a esta revolución científica y tecnológica.

Figura 12. Distribución geográfica por provincias (mapa) y por comunidades autónomas (tabla) de las instituciones españolas que desarrollan alguna actividad en el campo de la nanotecnología. El diámetro de los puntos es proporcional al número de instituciones encontradas en la provincia



Comunidad Autónoma	#	%	Comunidad Autónoma	#	%
Comunidad de Madrid	47	37,0	Galicia	3	2,4
Cataluña	20	15,7	Región de Murcia	2	1,6
Andalucía	15	11,8	Islas Baleares	2	1,6
Comunidad Valenciana	7	5,5	Cantabria	2	1,6
País Vasco	6	4,7	Extremadura	2	1,6
Castilla La Mancha	5	3,9	Asturias	2	1,6
Castilla León	4	3,1	La Rioja	0	0
Canarias	4	3,1	Ciudad Autónoma de Ceuta	0	0
Navarra	3	2,4	Ciudad Autónoma de Melilla	0	0
Aragón	3	2,4			

La mayor concentración de instituciones detectada en Barcelona y, especialmente en Madrid, es debida a que muchos de los centros e institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas tienen sus sedes en estas provincias.

Grupos de Investigación

Se han encontrado más de 450 grupos de investigación que desarrollan o han desarrollado alguna actividad en el campo de la nanotecnología. Estos grupos de investigación, como cabe esperar, se encuentran distribuidos, al igual que las instituciones de la figura 12, por toda España, habiéndose encontrado una mayor concentración en Madrid y Barcelona debido, principalmente, al mayor número de instituciones sitas en dichas regiones.

La Nanotecnología en IV Plan regional de Ciencia y tecnología de la Comunidad de Madrid

Los Programas de actividades de I+D son un nuevo instrumento de actuación para el apoyo a los Grupos de Investigación en el marco del IV PRICIT que pretenden fomentar la investigación cooperativa entre diferentes Grupos de Investigación de distintos Organismos y en particular de nuestras Universidades con los Organismos Públicos de Investigación radicados en la Comunidad de Madrid, de manera que puedan afrontar mejor la solución de los problemas que plantea la sociedad y den un mayor soporte al desarrollo de la innovación regional.

Así se financiarán a lo largo de los cuatro años del Plan Regional en torno a 100 líneas científico-tecnológicas estratégicas para la Comunidad de Madrid. Dichas líneas están orientadas a sectores de valor estratégico para el avance del conocimiento y la innovación en la región de Madrid.

Los Programas inicialmente preseleccionados en la línea de Nanotecnología comprenden temas como el estudio y fabricación de nanoestructuras magnéticas y sus aplicaciones tecnológicas y en Biomedicina; el estudio de las propiedades mecánicas, eléctricas y catalíticas de nanoobjetos, su síntesis, caracterización y modelización, y el análisis de estructura y función de nanomáquinas y otros sistemas biológicos y su integración en dispositivos nanomecánicos.

Con los Programas de actividades de Investigación que se financien se pretende contribuir a que:

- Nuestra región cuente con un acervo de capital humano bien formado, capaz de asumir el papel de líder, motor e impulsor del desarrollo.
- Dar flexibilidad, a nuestro sistema facilitando la capacidad de respuesta, creatividad de los individuos y organizaciones y su auto-organización.
- Mejorar la gestión regional del conocimiento capaz de vertebrar los recursos públicos y privados en investigación, fomentando la cooperación entre las instituciones proveedoras y demandantes de “conocimiento”.
- Conseguir mejorar la posición competitiva de los investigadores y estimularlos a competir en la obtención de recursos tanto públicos como privados.
- Buscar la cooperación, complementariedad e integración tanto interregional, como con la Administración General del Estado, la Unión Europea y demás redes globales del conocimiento.
- Crear una imagen de marca que diferencie e identifique a Madrid como un centro de servicios científico-tecnológicos de alto valor añadido
- Contribuir a la creación del Espacio Europeo de Investigación favoreciendo la coordinación de esta acciones con las correspondientes al Programa Marco europeo de

investigación y al Plan Nacional de I+D+i con el que se complementa.

Los Programas de actividades de investigación incluyen como novedad el apoyo desde la investigación a la creación de Programas de postgrado entre varios Organismos fomentando su articulación con las nuevas estrategias europeas en el marco de la creación del Espacio Europeo de Enseñanza Superior y favoreciendo la movilidad de los investigadores dentro y fuera de la región.

3. CONCLUSIONES

- Se ha detectado una importante actividad en el campo de la nanotecnología en España, con la publicación de numerosos trabajos, la participación en proyectos europeos y nacionales y un creciente interés por parte de la industria en muchos casos con implicación real.
- Esta actividad demuestra que la comunidad científica en su conjunto es consciente de la potencialidad de esta tecnología emergente desde comienzos de los 90. El mundo empresarial ha iniciado su incorporación a esta línea y, en promedio, puede considerarse que se encuentra inmerso en una fase exploratoria y analizando las potencialidades de la nanotecnología.
- La I+D española en el ámbito de la nanotecnología, tanto mundialmente como dentro de Europa, se encuentra en niveles similares a los que ocupa en otras ramas de la ciencia y la tecnología (cerca del 2% de los trabajos y entre los 12 primeros países).
- La actividad en nanotecnología dentro de España está muy diversificada y se extiende a todas las ramas de la ciencia: Física, Química, Medicina, Biología, Ingeniería...
- España se ha incorporado con éxito al VI Programa Marco y ha incrementado recientemente su participación en las distintas actividades europeas, tales como los proyectos de investigación, las redes de excelencia...
- El trabajo desarrollado en el campo de la nanotecnología ha empezado a generar ya patentes y aplicaciones prácticas.

- La transferencia de conocimientos entre el mundo académico y el empresarial necesita ser potenciada. La situación es mejor que en otros ámbitos del conocimiento, porque al tratarse de un tema altamente innovador han proliferado las EBT-Empresas de Base Tecnológica (*spin-offs*) surgidas desde las universidades y los centros de investigación en el ámbito de la nanotecnología.
- A pesar de la abundancia y de la excelencia de los grupos de investigación que trabajan en nanotecnología en España, se ha tardado mucho tiempo en diseñar una estrategia específica destinada a impulsar esta tecnología. La "Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología" dentro del "Programa Nacional de Investigación y Desarrollo", aprobada el pasado 2004, busca aglutinar de forma constructiva los esfuerzos de todas las personas cualificadas y poder servir de referente a la industria que demande conocimientos en este novedoso tema.

BIBLIOGRAFÍA

- SÁNCHEZ, J.; GUERRERO, H.; MARTÍN, S.; TAMAYO, R.; COSME, M. L.; MAZADIEGO, R.; SERRANO, P. (2005) *Nanotecnología en España*. Sistema Madri+d (Libro 20). Dirección General de Universidades e Investigación, Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid. (versión electrónica descargable desde: <http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/Publicacion/default.asp>)
- SÁNCHEZ, J.; GUERRERO, H.; MARTÍN, S. TAMAYO, R.; (2004) *Nanoindex*. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). INTA/NTX/RPT/1000/02/04.
- COMISIÓN EUROPEA (2004) *Towards a European Strategy for Nanotechnology*. Comunicación de la Comisión 338. (Versión electrónica descargable desde <http://www.cordis.lu/nanotechnology>)
- SCHULENBURG, M. *Nanotechnology: Innovation for tomorrow's world*. Oficina para publicaciones oficiales de las Comunidades Europeas. ISBN 92-894-7498-X.
- COMISIÓN EUROPEA (2004) *Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis*. Extraído de la Conferencia organizada en Bruselas, los días 1 y 2 de Marzo de 2004 sobre "Salud y Protección del Consumidor". Secretaría General de la Comisión Europea.
- BACHMANN, G.; BOGEDAL, M.; CORREIA, A.; HOFFSCHULZ, H.; HOLM PEDERSEN, S.; LOCATELLI, S.; LOUGHRAN, O.; MALSCH, I.; NICOLLET, C.; TERRYLL, K. (2004) *Nanotechnology in the candidate countries*. Segundo Informe de Nanoforum. Marzo.
- National Nanotechnology Initiative. Suplemento al presupuesto del Presidente de EE.UU (2004).
- ROMAN, C. (2002) *It our's to lose. An Analysis of EU Nanotechnology Funding and the Sixth Framework Programme*. European NanoBusiness Association (Bruselas). Octubre.
- DREXLER, K. E. (2004) *Nanotechnology: From Feynman to Funding*. Foresight Institute. Bulletin of Science, Technology & Society, Vol 24, No 1 (21-27). Febrero.
- TAYLOR, J. M. (2002) *New Dimensions for Manufacturing: A UK Strategy for Nanotechnology*. Informe del "Grupo Asesor del Reino Unido sobre Aplicaciones de la Nanotecnología". Junio.
- ROMÁN, C. (2002) *How nano is Europe? An Analysis of Nanotechnology-based Expressions of Interest in the Sixth Framework Programme*. European NanoBusiness Association (Bruselas). Noviembre.
- COMISIÓN EUROPEA (2005) *Nanociencias y Nanotecnologías: Un plan de acción para Europa 2005-2009*. Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo y al Comité Económico y Social Europeo. Bruselas, Junio.
- BRIONES, F.; CORREIA, A.; SERENA, P. A.; (2003) *Informe sobre la Situación de la Nanociencia y de la Nanotecnología en España y Propuesta de Acción Estratégica dentro del Plan Nacional de I+D+I (2004-2007)*. Red Española de Nanotecnología Nanospain. Junio.
- IV PROGRAMA MARCO (2004) *Programa de Trabajo de la Prioridad NMP*. Diciembre 2004.
- Oficina Europea de Patentes. <http://www.espacenet.com/>
- Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos. <http://www.uspto.gov/>
- Base de datos de Referencias Científicas y Actas de Congresos INSPEC. <http://www.iee.org/Publish/INSPEC/>
- Base de datos de Referencias Científicas y Actas de Congresos Current Contents.
- Red Española de Nanociencia: Nanospain <http://www.nanospain.org/>
- Red Europea de Nanoelectrónica: Phantoms <http://www.phantomsnet.net/>

Algunas tesis sobre Nanotecnología y Nanociencia

- Medidas de transporte electrónico en cables moleculares: nanotubos de carbono y ADN
Cristina Gómez-Navarro
Director: Julio Gómez-Herrero; UAM
- Sistemas metal-semiconductor estudiados mediante microscopía de efecto túnel de temperatura variable: propiedades electrónicas, transiciones de fase y difusión superficial
Ivan Brihuega
Director: Jose M. Gómez-Rodríguez; UAM
- Estadística de la dispersión de ondas en medios desordenados
Luis S. Froufe Pérez
Director: Juan José Sáenz; UAM
- Métodos DFT y STM de Primeros Principios para el Estudio de Superficies Semiconductoras con Adsorbatos: Pasivación, Nanohilos y Transiciones de Fase
César González
Directores: Ruben Pérez, Fernando Flores y José Ortega; UAM
- Desarrollo de un sensor nanomecánico para estudios de absorción de moléculas biológicas y reconocimiento molecular
Mar Álvarez Sánchez
Director: Javier Tamayo; IMM-CNM-CSIC
- An optical study of photonic crystals based on opals
Juan Francisco Galisteo López
Director: Cefe López Fernández; ICMM-CSIC
- Influencia de pequeños contenidos de Ni y Cr en el comportamiento magnético y propiedades de corrosión de aleaciones nanocristalinas
Pedro Agudo
Director: Manuel Vázquez Villalabeitia; ICMM-CSIC
- Non perturbative approaches to transport in nanostructures
Pablo San José Martín
Director: Francisco Guinea López; ICMM-CSIC
- Síntesis de materiales de interés en el desarrollo de cristales fotónicos autoensamblados
Beatriz Hernández Juárez
Director: Cefe López Fernández; ICMM-CSIC

Visiones acerca de la Nanotecnología

Este documento recoge las impresiones sobre la Nanotecnología de personas relacionadas con la investigación, la gestión de la investigación o la política científica. Las personas entrevistadas cubren tres ámbitos: la Unión Europea, España (tanto a nivel estatal como autonómico) y la Comunidad de Madrid.

Patrick Van-Hove

IST-FET, Comisión Europea

José Luis Viviente Solé y Renzo Tomellini

Unidad de Nanociencias y Nanotecnologías. Dirección General de Investigación. Comisión Europea

Manuel Vázquez Villalabeitia

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC; Gestor de la Acción Estratégica en Nanociencia y Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia

Antonio Correia (1) y Fernando Briones (2)

(1) Fundación Phantoms

(2) Instituto de Microelectrónica de Madrid- CSIC

José Manuel Báez Cristóbal

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología

Jordi Pascual Gainza

Director ejecutivo del Institut Català de Nanotecnologia

Ricardo Ibarra García

Director del Instituto de Nanotecnología de Aragón (INA)

Héctor Guerrero Padrón

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) Circulo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología

Rodolfo Miranda Soriano

Catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid

Clara Eugenia Núñez

Directora General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid

Patrick Van-Hove

IST-FET, Comisión Europea

¿Qué papel tiene reservada la Nanotecnología en el programa IST/FET del VII PM de la UE?

En este momento, estamos discutiendo con científicos la definición del programa IST/FET en el VII PM. Algunos temas de investigación en nanoelectrónica y nanotecnología son prioritarios. En primer lugar, tenemos que buscar soluciones para el futuro de la industria de los semiconductores. Desde hace 40 años, hemos podido duplicar cada dos años el número de transistores en un chip, pero ahora los límites a esta progresión parecen más evidentes. Necesitamos nuevas soluciones para poder seguir con la miniaturización con conceptos como nanotubos, nanohilos o electrónica molecular.

En segundo lugar, queremos aprovechar las oportunidades que nos ofrecen nuevos materiales y nuevas estructuras a escala nanométrica, para desarrollar funciones y dispositivos que utilicen nuevos fenómenos físicos como magnetismo o

'spintronics', fotónica o física cuántica. Esperamos que esos desarrollos puedan combinarse a medio plazo con tecnologías estándares de semiconductores.

En tercer lugar, reconocemos que nuevos descubrimientos científicos ocurren a menudo en el cruce de varias disciplinas científicas o tecnológicas. Vemos particularmente oportunidades en los límites entre la nanoelectrónica y las ciencias de la vida. Eso podrá ayudarnos a comprender mejor el tratamiento de la información en los 'sistemas vivos', a descubrir nuevos materiales y técnicas para construir sistemas artificiales y para crear sistemas híbridos, más allá de los sensores o implantes de hoy.

El VII Programa Marco se está discutiendo entre el Consejo y el Parlamento, teniendo como base la proposición de la Comisión. Esperamos una decisión final en el 2006. Las consultas con la comunidad científica continuarán a principios del 2006 para identificar los objetivos del programa. Se espera que el programa IST/FET apoye investigación cooperativa entre equipos multidisciplinarios para afrontar estos retos.

José Luis Viviente Solé y Renzo Tomellini

Unidad de Nanociencias y Nanotecnologías. Dirección General de Investigación. Comisión Europea

¿Qué papel tiene reservada la Nanotecnología en el VII PM de la UE¹?

Las Nanociencias y Nanotecnologías (N+N) tienen un papel relevante dentro del Séptimo Programa Marco (VII PM) propuesto por la Comisión Europea². Con vistas a la “construcción del Espacio Europeo de la Investigación al servicio del crecimiento”³ y en consonancia con el Plan de Acción en N+N (PANN) adoptado por la Comisión⁴, que propone una serie de iniciativas interconectadas para la aplicación inmediata de una estrategia segura, integrada y responsable en materia de N+N a nivel Europeo, el VII PM se articula, principalmente, en cuatro grandes programas, que corresponden a cuatro objetivos fundamentales de la política de investigación europea: Cooperación, Ideas, Personas y Capacidades⁵.

Los objetivos del VII PM son coincidentes con los desafíos identificados en el PANN, que plantea una serie de acciones complementarias coherentemente integradas que se implementan a través de siete grandes ejes: la investigación; las infraestructuras; los recursos humanos; la innovación; integración de la dimensión social; la salud pública, seguridad y protección ambiental de los consumidores y la cooperación internacional. La definición e implementación de estas acciones se realiza teniendo en cuenta la complementariedad y sinergia de todos los actores implicados en las mismas. Así, dentro de la Comisión, el PANN se coordina a través de un “Grupo Interservicios” en el que participan unas 250 personas pertenecientes a 17 Direcciones Generales y cuya coordinación está actualmente a cargo de la Unidad de Nanociencias y Nanotecnologías de la Dirección General de Investigación. Esta colaboración entre los servicios de la Comisión está permitiendo una visión y un enfoque global, así como acciones coordinadas, coherentes y eficientes en la implementación del Plan de Acción.

¹ El presente documento sólo describe la opinión personal de los autores y no representa ninguna posición oficial de la Comisión Europea.

² COM(2005) 119. (<http://cordis.europa.eu.int/fp7/>)

³ COM(2005) 118 “Building the ERA of Knowledge for growth”

⁴ COM(2005) 243.

(<http://cordis.europa.eu.int/nanotechnology/actionplan.htm>)

⁵ COM(2005) 440 “Cooperation”; COM(2005) 441 “Ideas”; COM(2005) 442 “People”; COM(2005) 443 “Capacities”

(http://europa.eu.int/comm/research/future/documents_en.cfm)

El VII PM y sus Programas Específicos, recientemente propuestos por la Comisión (ambos tienen aún que ser aprobados por el Parlamento Europeo y el Consejo), detallan la estrategia de la Comisión en el área de la investigación comunitaria. Así, el Programa “Cooperación”, que corresponde a más de la mitad del presupuesto del VII PM, tiene como objetivo el apoyo a las actividades de investigación transnacionales, a través de los proyectos en colaboración, las redes de excelencia y la coordinación de los programas de investigación nacionales y/o regionales (ERA-NET). La definición de los tópicos de investigación se realizará también teniendo en cuenta las Agendas de Investigación Estratégicas definidas por las “Plataformas Tecnológicas”⁶. La cooperación internacional es otra de las líneas de actuación en este programa.

El programa “Ideas” incorpora la creación del Consejo Europeo de Investigación para promover la investigación básica a nivel Europeo mediante el apoyo a grupos de investigación individuales. El programa “Personas” engloba las actividades conocidas ahora por acciones “Marie Curie”. Finalmente, el programa “Capacidades” presta apoyo a aspectos claves de la capacidad de investigación e innovación europea: las infraestructuras de investigación, la investigación en beneficio de las PYMES, las agrupaciones regionales al servicio de investigación, etc.

Como puede apreciarse las coincidencias entre el PANN y el VII PM son manifiestas. ¿Por qué esta coincidencia?. Las N+N están demostrando ser y serán uno de los vehículos más eficientes para aumentar la competitividad de la industria y generar el conocimiento necesario para la transformación de nuestra economía de acuerdo a los objetivos de Lisboa: “que Europa llegue a ser la economía basada en el conocimiento más dinámica y competitiva del mundo”. Para ello es necesario un planteamiento global, integrador y responsable que aborde lo que se llama el triángulo del conocimiento: la educación, la investigación y la innovación. Este triángulo es también una de las bases del PANN. Las N+N presentan, por otro lado, un rasgo de interés para las acciones comunitarias que conforman la estrategia de Lisboa: son una ciencia y tecnología disruptivas que permiten la creación de nuevos productos, que a largo plazo es lo que permitirá responder más eficientemente a las necesidades de los ciudadanos y contribuir a los objetivos de competitividad y desarrollo sostenible de la Unión y de muchas de sus políticas.

⁶ http://www.cordis.lu/technology-platforms/home_en.html

Manuel Vázquez Villalabeitia

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC;
Gestor de la Acción Estratégica en Nanociencia y
Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia

¿En qué consiste la Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia?

Los extraordinarios avances científicos y tecnológicos alcanzados a lo largo de la última década han permitido en estos momentos la fabricación, caracterización y manipulación de la materia a escala nanométrica de forma controlada. Esto ha despertado un enorme interés por las nuevas posibilidades que basándose en nuevos descubrimientos científicos permiten augurar extraordinarios avances tecnológicos con repercusión en la sociedad en los aspectos más amplios y variados de la vida cotidiana.

Estas características de gran actualidad e interés emergente han dado lugar a que se planteen nuevos retos dentro de la comunidad científica internacional. La naturaleza de estos estudios a escala nanométrica, con unas características bien específicas, requiere generalmente la actuación coordinada de expertos en áreas muy dispares quienes coordinándose de forma adecuada posibilitan desarrollos de elevado rendimiento y alto valor añadido.

En el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+I) del Ministerio de Educación y Ciencia para el período 2004 – 2007 se contemplan distintas actuaciones acerca de la investigación en diversas áreas como por ejemplo dentro de las convocatorias de los Planes Nacionales de Materiales, Física, Química, Tecnologías de la Comunicación, etc... en donde se apoyan los desarrollos de estas disciplinas y entre las cuales un porcentaje creciente de solicitudes han ido dirigiéndose en los últimos años hacia los mencionados temáticas en la nanoescala.

Dentro de este contexto, la Acción Estratégica en Nanociencia y Nanotecnología ha sido planteada como una acción de carácter transversal dentro del mencionado Plan de I+D+I para potenciar estudios específicos en estas nuevas temáticas interdisciplinares de nanociencia y nanotecnología. La Acción Estratégica ha cristalizado en una primera convocatoria extraordinaria de proyectos de investigación independientemente de otras convocatorias específicas dentro del Ministerio relativas a grandes instalaciones y equipamientos, o de personal.

En esta convocatoria se promueve el desarrollo de proyectos de la más elevada calidad científica, pero también se atiende

a otros parámetros como son en particular su carácter finalista (potenciando objetivos concretos que en su momento puedan dar lugar a desarrollos de interés tecnológico), o el mencionado carácter multidisciplinar (potenciando la acción coordinada e interdisciplinar de grupos de conocimiento complementario).

Una vez contrastadas las temáticas priorizadas en convocatorias similares por agencias de financiación de otros países representativos de los mayores avances en nanociencia y nanotecnología, se presentó en nuestra convocatoria una serie de objetivos temáticos priorizados: nuevos fenómenos fundamentales adscritos a la nanoescala, nanobiotecnología y biomedicina, nanoestructuras y nanodispositivos para el ahorro de energía y el medio ambiente, almacenamiento magnético de la información, nanoelectrónica y optoelectrónica, máquinas nanométricas y nanomanipulación, y nanocomposites.

En esta convocatoria extraordinaria y desde un punto de vista formal se ha posibilitado la presentación de solicitudes de proyectos “nano” incluso por aquellos grupos con dedicación previa a proyectos de otros programas.

La convocatoria ha sido objeto de un interés realmente fuera de lo usual por parte de la comunidad científica española: un total de 211 proyectos (incluyendo 567 subproyectos) cuya solicitud de presupuestos total ha ascendido a 98 M€ (bastante superior a los 12 M€ disponibles). Ha involucrado a unos 5.000 investigadores (de los cuales entorno a 2.400 doctores) en áreas tan diversas como Física, Química, Biología, Medicina, Ingeniería de Materiales, etc... Por otra parte, si bien la convocatoria no contemplaba la financiación directa a empresas, un total de 294 ha manifestado su interés por la convocatoria mediante cartas de apoyo con diverso grado de involucramiento.

Tras laborioso proceso de evaluación y selección, han sido propuestos para su financiación 23 proyectos coordinados que incluían un total de 93 subproyectos. En particular se han podido identificar 4 grandes áreas temáticas específicas de muy elevado potencial en España: nanomanipulación & control en la nanoescala, nanobiomedicina, nanoelectrónica, y nanotecnologías y nanomateriales para la energía.

Se puede considerar que esta convocatoria ha presentado un razonable éxito, si bien dado el elevado número de propuestas no ha podido alcanzar a todos los grupos y proyectos de excelencia. Este éxito indica la necesidad de continuar el apoyo a estos temas, modificando quizás algunos aspectos formales en futuras nuevas convocatorias.

Antonio Correia (1) y Fernando Briones (2)

(1) Fundación Phantoms

(2) Instituto de Microelectrónica de Madrid-CSIC

¿Cuál ha sido el papel de NanoSpain en el desarrollo de la Nanociencia y la Nanotecnología en España?

El principal objetivo de la Red NanoSpain es facilitar el intercambio y la transferencia de conocimientos entre los grupos de los distintos agentes del sistema de ciencia-tecnología-empresa, de manera que se fomente la cooperación entre ellos para propiciar la creación de redes de excelencia, plataformas tecnológicas, proyectos de investigaciones pluridisciplinarias y se mejore la coordinación entre las infraestructuras científico-tecnológicas, así como la vertebración de las comunidades científicas de cara al Espacio Europeo de Investigación. El cumplimiento de dicho objetivo contribuyó al desarrollo de la Nanociencia / Nanotecnología en España durante estos últimos años.

La Red NanoSpain, no es una red como las que hasta ahora se han planteado en España y han sido financiadas por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC). Es una Iniciativa de carácter mucho más ambicioso, a imagen de las iniciativas que se siguen en EE.UU. o en Europa (Redes de Excelencia o Acciones Coordinadas). De hecho, persigue unos objetivos que van más allá de los encomendados a una Red convencional, para poder definir de manera correcta los parámetros del Programa Nacional de Nanotecnología y fortalecer la dimensión de la Nanotecnología española en el Espacio Europeo de investigación e innovación. El primer documento elaborado por la Red sobre el estado de la Nanotecnología en España, y que sirvió de base para la preparación de la Acción Estratégica en Nanociencia y Nanotecnología dentro del plan nacional I+D+i (Ministerio de Educación y Ciencia) en 2003, esta disponible en la página WEB de la Red: <http://www.nanospain.org>.

A fecha de hoy, la Red NanoSpain está integrada por 182 grupos de investigación y empresa, reuniendo a más de 1200 investigadores. En nuestra opinión pocas iniciativas y redes cuentan con un número tan elevado de grupos participantes, lo que demuestra dos cosas: la masa crítica que existe en este campo y la iniciativa con que los científicos-tecnólogos abordan la problemática que tienen planteada en cuanto a la necesidad de coordinarse e intercambiar información.

La Red NanoSpain pretende alcanzar los siguientes objetivos generales:

- Contribuir a la generación de conocimiento en las distintas áreas de la Nanociencia / Nanotecnología.
- Potenciar la visibilidad y la comunicación de los avances de la Nanotecnología en España.
- Fomentar la creación de grupos de I+D multidisciplinares.
- Favorecer la integración de los grupos de I+D españoles en los proyectos Europeos del VII Programa Marco de la U.E.
- Establecer un nexo entre todos los miembros a través de un sitio WEB dinámico, de permanente actualización.
- Conectar con otras iniciativas internacionales, regionales o nacionales como las recientes plataformas tecnológicas.
- Organizar una reunión general por año de todos los miembros de la red.
- Formar grupos de trabajo según temáticas y afinidades.
- Organizar reuniones de cada uno de los grupos temáticos.
- Atraer nuevos laboratorios de empresas y Organismos Públicos a esos grupos de trabajo (Red abierta).
- Elaborar informes por áreas/grupos para hacer un documento que sirva de base para acciones posteriores (Plan Nacional del Ministerio de Educación y Ciencia, etc.).
- Divulgar la Nanotecnología contactando con medios de comunicación / Mejorar la comunicación a la sociedad de los avances que se vayan produciendo en las distintas áreas de la Nanociencia / Nanotecnología.
- Atraer a empresas para su mejor integración en esta nueva área e informarlas de lo que representa para su futuro la Nanotecnología.
- Incrementar la participación de las empresas en las actividades de I+D+I.

Otra tarea que ha contribuido al desarrollo de la Nanociencia y Nanotecnología en España es la organización de las reuniones anuales de la Red, donde investigadores españoles proporcionan un amplio panorama de lo que se ha dado en llamar "Nanociencia" y "Nanotecnología" y aportan su visión y percepción del futuro a corto y medio plazo de esta nueva rama del saber.

Durante cada reunión, también se presentan las iniciativas nacionales existentes (programas de financiación a nivel local y nacional, plataformas tecnológicas, otras redes) así como los proyectos mas representativos financiados por la Acción Estratégica en Nanociencia y Nanotecnología dentro del plan nacional I+D+I 2 (Ministerio de Educación y Ciencia).

Más información sobre la Red NanoSpain:
<http://www.nanospain.org>

José Manuel Báez Cristóbal

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología

¿Cómo cree que afectará la Nanotecnología a la industria española?

Yo espero que las aplicaciones de la nano-tecnología tengan un impacto positivo en la industria española, pero no se debe excluir la posibilidad de que, si nuestro sistema productivo no se lanza de forma decidida al aprovechamiento de las nano-tecnologías se pierda competitividad de forma muy significativa. Por otra parte, creo que el nivel de conocimiento disponible entre los investigadores del sistema público tanto en cantidad como en calidad, para apoyar el despegue nano-tecnológico del sector privado, permite ser optimista.

Por sectores, yo creo que en el sector aeroespacial es muy probable que se identifiquen aplicaciones con cierta rapidez: la industria española es reconocida por su dominio de las tecnologías estructurales, en particular en el uso de la fibra de carbono para estructuras aeronáuticas y espaciales; dado que la introducción de las nano-fibras de carbono parece ser una de las aplicaciones tecnológicas más maduras, será un imperativo incorporar la nano-tecnología si no se quiere perder este importante nicho de mercado de nuestra industria aeroespacial: Posteriormente, aunque quizás antes de lo que nos podemos pensar, puede tener un impacto similar entrada de la tecnología de nano-tubos de carbono con nuevas prestaciones estructurales y funcionales para este sector.

Otros desarrollos, ligados a la ciencia de materiales, que pueden tener gran impacto en las áreas del transporte disponen en España de una base de conocimiento científico muy importante que debiera permitir un rápido despegue en sectores como la automoción, ferrocarril, naval, ...

También creo que el sector energético, en el que nuestro país cuenta con empresas de nivel mundial, es un claro candidato a incorporar productos y procesos basados en la nano-tecnología, en particular para cuestiones ligadas al hidrógeno como fuente de energía. En una primera etapa, las nano-tecnologías ligadas a la entrada en el mercado de las pilas de hidrógeno pueden ser un factor de competitividad de primera magnitud. También el almacenamiento de hidrógeno para su uso como combustible, presenta retos que parecen estar más cerca de ser resueltos con la nano-tecnología. Dada la importancia que esta tecnología implica para la sostenibilidad del desarrollo económico mundial, esta área podría recibir inversiones masivas y ser desarrollada con gran premura.

También me gustaría resaltar el gran impacto de las nano-tecnologías en las aplicaciones médicas tanto en farmacología como en sistemas de diagnóstico. Probablemente, este tipo de productos puede tardar bastante en llegar al mercado debido a los dilatados procesos de validación de los productos ligados a la salud de la ciudadanía, especialmente los invasivos; sin embargo las empresas que quieran competir en este mercado dentro de 10 años deben empezar ya a tener en cuenta en sus nuevos desarrollos las posibilidades que las nano-tecnologías apuntan con el conocimiento que ya está disponible.

Por último, un sector muy importante para nuestra economía como el de la construcción, tanto de edificios como de infraestructuras públicas, dispondrá de grandes oportunidades si toma en consideración los desarrollos que la nano-tecnología puede poner a su alcance: desde los materiales con capacidades mecánicas mejoradas, con notables reducciones de masa, hasta los materiales con funcionalidades de gran interés para ciertos elementos constituyentes de la construcción: aislamientos, materiales resistentes para condiciones atmosféricas extremas y otros.

Jordi Pascual Gainza

Director ejecutivo del Institut Català de Nanotecnologia

¿Cuál ha sido el impacto de la creación del Institut Català de Nanotecnología?

Últimamente se ha producido una eclosión de la nanotecnología que trasciende del mundo de la investigación y ha llegado a interesar a la sociedad en general. Se espera mucho de las aplicaciones que se pueden derivar y las perspectivas económicas son extraordinarias.

La Generalitat de Catalunya a través del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació (DURSI), ha iniciado una serie de medidas para potenciar determinados campos de investigación y desarrollo en los cuales aspira a ser un referente. Entre los campos a potenciar, se ha considerado que la nanociencia y nanotecnología es una de las apuestas claras de futuro.

La Fundació Privada Institut Català de Nanotecnologia (ICN), se constituyó el 11 de julio de 2003. Está regida por un órgano superior de gobierno, el Patronato, formado por el DURSI y la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), tiene un Director y dispone de un Consejo Científico que es el órgano asesor. El Presidente del Patronato es el Conseller de la Generalitat de Catalunya, el Prof. Carles Solà, el Director del ICN es el Prof. Jordi Pascual, Catedrático de Física Aplicada de la UAB y el Presidente del Consejo Científico es el Prof. Miquel Salmerón, del Lawrence Berkeley Laboratory (Ca,USA), que además hace de asesor del ICN.

Inicialmente el ICN se concibió como un instituto catalán de investigación con edificio propio, ubicado en el Campus de la UAB. Con posterioridad, el CSIC mostró su interés en participar en la puesta en marcha de un centro mixto que englobase el ICN y el CSIC. El 18 de mayo de 2005 se firmó un Protocolo de Intenciones entre el DURSI, el CSIC, la UAB y el ICN, a fin de elaborar un Convenio de colaboración. El Convenio está en la última fase de elaboración y se espera se firme en los próximos meses. La persona encargada por parte del CSIC para pilotar el proceso es el Prof. Albert Figueras, Profesor de Investigación. El acuerdo supone que el CSIC se hará cargo de la construcción del edificio, y el DURSI aportará el capital necesario para la compra del equipo científico del centro mixto, que muy probablemente se llame Centre d'Investigacions en Nanociència i Nanotecnologia

(CIN2). Cuando el CIN2 esté a pleno rendimiento, se estima que el número de investigadores sea del orden de unos 200.

Aún cuando estamos en fase de crecimiento y consolidación, y esté previsto que tardemos aún unos pocos años para alcanzar el ritmo estable de funcionamiento, podemos avanzar algunas de las características y líneas de trabajo.

El campo de la nanociencia y la nanotecnología es amplísimo y, a fin de diseñar un centro de investigación se han de escoger unas determinadas líneas científicas que den coherencia al centro. Un primer punto a considerar es el entorno en que nos movemos. Así, en el Campus de la UAB están ubicados centros e institutos de investigación potentes en temas afines. Es el caso de la propia UAB, con Departamentos, Servicios Científico-Técnicos y red de hospitales y otros centros asociados; institutos del CSIC, como el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM) y el Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB); MATGAS, asociación de interés económico entre Carburos Metálicos, el CSIC y la UAB; el propio Laboratori de Llum Síncrotró, el ALBA; el Parc Tecnològic del Vallès, etc. En este entorno, que forma parte de la Esfera UAB, nos encontramos cómodos y nuestra voluntad es establecer sinergias en temas de investigación.

A día de hoy, la investigación la estructuramos en cuatro departamentos. Tres con carácter más marcadamente científico y el cuarto, más tecnológico. Esta distinción no es nítida y responde a la voluntad de alcanzar niveles muy altos en investigación básica, pero sin descuidar la necesidad de abordar temas que más directamente inciden en sectores de interés económico y social.

Inicialmente, los tres departamentos más científicos desarrollarán su actividad en los siguientes ámbitos:

- Modelización, simulación, "imaging" y manipulación atómica y molecular.
- Síntesis y funcionalización de nanoestructuras.
- Propiedades físicas de nanoestructuras.

Además de esta estructura de organización vertical, se piensa abordar también objetivos en función de los *outputs*, en una perspectiva horizontal del centro. En este sentido, tenemos intención de incidir en temas como metrología, instrumentación, energía, nanobiosensores y aplicaciones médicas.

Ricardo Ibarra García

Director del Instituto de Nanotecnología de Aragón (INA)

¿Cuál ha sido el impacto de la creación del Instituto de Nanotecnología de Aragón (INA)?

El Instituto de Nanociencia de Aragón (INA), fue creado el 8 de abril del 2003, por decreto 68/2003, del Gobierno de Aragón, a instancia de la Universidad de Zaragoza. Desde la creación del Instituto se ha desarrollado una intensa labor para conseguir, en el menor plazo posible, la puesta en marcha de los nuevos laboratorios. Estas instalaciones únicas en su género nos dan una gran potencia para abordar una investigación competitiva en el campo de la Nanociencia. Esta tarea ha sido compaginada con el inicio de los trabajos en las diferentes líneas de investigación del instituto utilizando los medios de la Universidad de Zaragoza, del CSIC y diversas empresas con las que se han firmado contratos y convenios de colaboración. Desde el comienzo de las actividades del INA, hemos podido constatar que realmente comienza a llenar un hueco importante en el sistema de Ciencia y Tecnología de nuestro entorno. Por una parte, la puesta en marcha de sus infraestructuras, ha borrado los límites que su ausencia imponía a nuestra actividad investigadora y a las aspiraciones y proyección de nuestras posibilidades para poder desempeñar un papel competitivo en el dinámico e intensamente desarrollado a nivel mundial campo de la Nanociencia y Nanotecnología.

Por otra parte, ha supuesto un estímulo mucho más allá de lo predecible en cuanto a abordar una investigación multidisciplinar que nos está permitiendo desarrollar una investigación de frontera entre distintas disciplinas científicas: Física, Química, Ingeniería, Bioquímica y Medicina. Esto se comienza a plasmar en el papel de liderazgo que el INA está adquiriendo en la captación de recursos en convocatorias interdisciplinares.

El rápido despegue de nuestro Instituto está siendo posible por la colaboración ya establecida con otros Institutos de Investigación como el de Ciencia de los Materiales de Aragón, Departamentos Universitarios y Hospital Clínico Universitario que han volcado su gran experiencia en las distintas áreas de Investigación hacia un nuevo modelo de investigación interdisciplinar.

Los Objetivos del INA son:

- Establecer un marco de infraestructura de carácter interdisciplinar, que supere la concepción actual de Departamentos Universitarios y Centros que desarrolle una investigación.
- La existencia de esta infraestructura en un centro específico permite el desarrollo de líneas de investigación interdisciplinares, aprovechando los recursos humanos de nuestro entorno.
- Impulsar el desarrollo e innovación científica de nuestro entorno mediante la realización de contratos y proyectos conjuntos de investigación, que permita una transferencia tecnológica.
- Formación de nuevos científicos y tecnólogos en la utilización de las técnicas que serán básicas en la tecnología futura: ultra-alto vacío, diferentes tipos de microscopías, litografías etc...
- Garantizar una investigación de calidad y puntera en Nanociencia.
- Captar recursos a nivel Nacional e Internacional concurrendo a las diferentes convocatorias en una posición ventajosa, dado que la Nanociencia aparece como área prioritaria en todos los programas y convocatorias de proyectos de investigación.

Las líneas de actividad en las que el INA concentra su actividad son:

- Espintrónica: Campo de amplio interés, en el que la electrónica tradicional basada en la utilización de las propiedades de la carga del electrón se ve sobrepasada por la utilización de las propiedades magnéticas del mismo (su espín). Las uniones túnel magnéticas serán los dispositivos que constituirán la base de las futuras memorias RAM. Los futuros transistores estarán controlados por campos magnéticos, controlando el paso individual de los electrones ("single electron transistor").
- Nanoestructuras magnéticas: Se estudiarán las láminas magnéticas nanométricas que en la actualidad se utilizan en las cabezas lectoras de los discos duros de nueva

generación. Nanopartículas y sistemas granulares que serán la base de nuevos sensores y actuadores. Nanohilos metálicos y nanotubos que constituirán la circuitería de los dispositivos nanométricos.

- **Matrices nanométricas:** Estructuras grafiticas, silíceas y dendriméricas que permiten el encapsulamiento de partículas nanométricas con clara aplicaciones en medicina como tratamientos para el cáncer y ferrofluidos biocompatibles a utilizar en prótesis intracorpóreas. Desarrollo de sensores electro y bioquímicos de gran selectividad mediante de aplicación en la industria química y en medicina.
- **Nanobioingeniería y aplicaciones biomédicas:** Se desarrollan biosensores basados en el reconocimiento biomolecular. La funcionalidad de las proteínas es tan amplia que se espera su utilización en la nanoingeniería y medicina. Las aplicaciones biomédicas se extienden desde la cirugía mínimamente invasiva, necesitada cada vez más de sensores y actuadores a nivel micro y submicrométrico, hasta suministro local de nuevos fármacos y medios de contraste para exploración, diagnóstico y terapia.

Héctor Guerrero Padrón

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
Circulo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología

¿Qué papel juega la Nanotecnología en la I+D de la Comunidad de Madrid?

La Nanotecnología y la Nanociencia han experimentado un desarrollo espectacular desde finales de lo 80. La comunidad científica de Madrid no ha permanecido ajena a estas disciplinas y ya desde sus comienzos, muchos de los grupos de la región han ido incorporándolas a sus áreas de trabajo, bien mediante la evolución natural de sus campos de acción hacia el mundo nanoscópico, bien emprendiendo nuevas líneas de investigación y desarrollo.

Para hacerse una idea del alcance de esta afirmación, basta revisar la actividad científico-tecnológica desarrollada en la Comunidad de Madrid durante el pasado año 2004¹. De esta forma, de los 47 centros que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) posee en la Comunidad de Madrid, 27 de ellos han publicado algún trabajo relacionado con la Nanotecnología en el 2004. Teniendo en cuenta que 17 de los centros del CSIC en Madrid desarrollan su actividad en los ámbitos de las artes, las letras, la historia... quedan tan sólo tres centros de carácter científico-técnico de los que no se han encontrado trazas de actividad en Nanotecnología. La situación es similar en las Universidades de la Comunidad. De las existentes, todas las públicas y dos de las privadas, es decir un total de ocho, nueve incluyendo la UNED, han desarrollado alguna actividad en el ámbito de la Nanociencia. Igualmente, otros Organismos Públicos de Investigación situados en la región, como el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), el INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), varios hospitales del Insalud: Gregorio Marañón, Hospital de la Princesa... e, incluso, otros centros de investigación como el CIDA (Centro de Investigaciones de la Armada), el CEM (Centro Español de Metrología) se han involucrado en esta disciplina.

¹ Datos obtenidos del informe "Nanotecnología en España" del Círculo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología (CIMN) del Sistema Madri+d y el INTA (Marzo 2005).

Gracias a la actividad de estos centros, en la Comunidad de Madrid se ha publicado durante los últimos años, un promedio de un centenar de artículos cada año en el campo de la Nanotecnología, en revistas del "Science Citation Index". Esto supone el ~0,5% de lo producido a nivel mundial y el ~20% de las publicaciones generadas en España en este campo.

De estas cifras se concluye que la actividad en I+D en el ámbito de la Nanotecnología en la Comunidad de Madrid es muy intensa y, lo que es más importante, que se ha extendido a todos los ámbitos de la ciencia y la técnica. De esta forma, en la región se trabaja en Nanotecnología en las áreas de la Medicina, la Física, la Ingeniería, la Química, la Biología, el Medio Ambiente y un largo etcétera.

Este interés en Nanotecnología se extiende en la región, más allá del mundo académico y, si bien es cierto que el sector privado ha reaccionado con mayor lentitud, el CIMN (Círculo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología) ha detectado más de sesenta empresas actuando en este campo en la Comunidad de Madrid. La mayoría de estas empresas se encuentran en una fase de análisis de las posibilidades que la Nanotecnología ofrece, y sus acciones se han limitado a estudios técnicos, posicionamientos estratégicos, formación del personal, asistencia a congresos... actividades todavía alejadas de la verdadera I+D. De esta forma, el número de empresas en la región que poseen algún producto basado en la Nanotecnología o que, al menos, se encuentran inmersas en procesos de I+D en este campo, no alcanza la decena.

Las cifras sitúan a Madrid y Cataluña, con niveles de actividad comparables, a la cabeza de España (existen ligeras diferencias derivadas de sus particularidades como, por ejemplo, la mayor concentración de centros del CSIC en Madrid) y ligeramente por encima del País Vasco y la Comunidad Valenciana. Un escalón por debajo se sitúan otras regiones como Navarra, Aragón y Andalucía y, por último, el resto de Comunidades Autónomas en las que, aunque se ha detectado actividad en el campo de la Nanotecnología, su intensidad es mucho menor.

En el plano Institucional, tanto el Plan Nacional de Ciencia y Tecnología (Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología) como el Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica 2005-2008 (Área de Materiales y Nanotecnología) contemplan acciones y planes específicos dedicados a la Nanotecnología, que son consecuencia de su importancia en el sistema de I+D, ya no regional sino nacional. La participación madrileña en la Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología ha sido elevada, aunque los datos oficiales sobre participación y éxito en la convocatoria no han sido todavía publicados por el Ministerio de Educación y Ciencia.

Para finalizar, conviene citar el proyecto de futuro del Parque Científico de Madrid, que ha planteado la creación de un Instituto de Nanotecnología para impulsar dicho sector en la Comunidad y en España. En la actualidad se trata de un proyecto que se encuentra en negociación y en búsqueda de financiación.

Rodolfo Miranda Soriano

Catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid

¿Qué perspectivas abre para la Comunidad Científica Madrileña la constitución del Instituto Madrileño de Nanociencias y Diseño Molecular?

La Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid ha tomado recientemente la iniciativa de constituir institutos de investigación de excelencia científica en unas áreas seleccionadas por su valor estratégico y la existencia en ellas de grupos internacionalmente competitivos en la región. Una de estas áreas es la Nanociencia y el Diseño Molecular.

Toda una serie de circunstancias del pasado han contribuido a que la presencia internacional de científicos españoles en Nanociencia sea muy destacada. En particular, el capital humano existente en la Comunidad de Madrid en este campo es muy notable. Baste indicar que la información disponible en la Red NanoSpain (<http://www.nanospain.net>) indica que más de 40 grupos madrileños están relacionados de manera más o menos directa con la Nanotecnología. Un panorama similar se deduce de los estudios recientes del Think Tank en Nanotecnología financiado por la FECYT. La calidad científica de muchos de estos grupos se certifica fácilmente por los habituales indicadores internacionales, así como por los resultados obtenidos en la reciente convocatoria de Acción Estratégica en Nanotecnología del Ministerio de Educación y Ciencia, o en la convocatoria de Programas de Actividades de I+D para grupos de la Comunidad de Madrid. Todo ello demuestra, más allá de toda duda, que existe un potencial en Nanociencia muy importante en la Comunidad de Madrid, con un futuro prometedor garantizado por la presencia en estos grupos de jóvenes investigadores de calidad contrastada.

A pesar de ello, es también evidente que la capacidad de competir internacionalmente de estos grupos en el futuro se verá severamente limitada de persistir la falta de infraestructuras adecuadas de nanofabricación y caracterización, la desconexión existente entre grupos, la ausencia de esfuerzos científicos focalizados y la dificultad de hacer trabajar de manera realmente conjunta a expertos de diversas instituciones y especialidades. Todo ello hace imprescindible, si deseamos aprovechar plenamente el potencial humano existente, la constitución de un Instituto de investigación en Nanociencia en Madrid, dotado de una infraestructura adecuada, situada en una

sede física concreta, con líneas de investigación definidas y competitivas y una organización flexible, eficiente e independiente de las Instituciones académicas.

El esfuerzo requerido para el éxito de esta apuesta exige la plena implicación de las autoridades nacionales, esto es, del Ministerio de Educación y Ciencia, conjuntamente con las de la Comunidad de Madrid en la creación de un Instituto de Nanociencia y Diseño Molecular, cuya excelencia científica, flexibilidad de gestión y apertura de miras puedan convertirlo en foco de atracción para jóvenes (y no tan jóvenes) científicos de todo el mundo.

Ambas Administraciones, nacional y regional, han manifestado su propósito de hacer realidad este Instituto y junto con las Universidades Autónoma, Complutense y Politécnica, el CSIC y ciertas empresas de importancia, están colaborando estrechamente en la definición de la organización interna y estatus jurídico del Instituto.

Entre las posibles misiones del futuro Instituto de Nanociencia y Diseño Molecular de Madrid podríamos citar:

- Alcanzar la excelencia internacional en ciertas áreas de las Nanociencias y la Nanotecnología, estableciendo para ello una masa crítica de investigadores de calidad y equipamientos que permita realizar investigación internacionalmente competitiva y atrayendo a los mejores;
- Formar personal técnico y científico en las habilidades requeridas;
- Contribuir a la educación de estudiantes, analizar las repercusiones sociales de la Nanotecnología y transmitir a la sociedad las posibilidades y desafíos de la Nanociencia, y
- Promover la transferencia tecnológica y la creación de empresas en ésta área que contribuyan al desarrollo económico en Madrid y en España.

Objetivos todos ellos en cuya consecución la comunidad científica madrileña participará, sin duda con entusiasmo, ya que la existencia de un Instituto como éste ha sido persistentemente demandado como instrumento impulsor de las actividades actuales en Nanociencias y como oportunidad y desafío para las próximas generaciones.

Clara Eugenia Núñez

Directora General de Universidades e Investigación
de la Comunidad de Madrid

¿Qué papel juega la Nanotecnología en el Plan Regional de Investigación Científica y Técnica de la Comunidad de Madrid (IV PRICYT)?

La nanotecnología ha acaparado durante los últimos años un creciente interés debido a las prometedoras previsiones de futuro, en cuanto a sus posibilidades y aplicaciones, en un amplio rango de disciplinas. Precisamente, es en este carácter multidisciplinar donde radica una de las dificultades a la hora de trabajar y estudiar el amplio campo de la Nanotecnología. Cuando se recaba información, se consulta un artículo, una base de datos o, simplemente se habla de Nanotecnología, nos encontramos con que los expertos que trabajan en ésta desde las disciplinas (Medicina, Física, Ingeniería, etc.), han desarrollado su propia visión de lo que supone la nanotecnología. Este hecho supone una dificultad a la hora de obtener una visión multidisciplinar y global de la nanotecnología.

Con frecuencia se dice que la nanotecnología es potencialmente “disruptiva” o “revolucionaria” por sus efectos en los métodos de producción industrial. Se trata pues, de una tecnología que ofrece posibles soluciones a muchos problemas actuales mediante materiales, componentes y sistemas más pequeños, más ligeros, más rápidos y con mejores prestaciones. Lo que permite generar nuevas oportunidades de creación de riqueza y empleo. También se considera que la nanotecnología puede hacer una aportación esencial a la solución de problemas medioambientales de carácter mundial por el desarrollo de productos y procesos más ajustados a usos específicos, el ahorro de recursos, y la disminución de emisiones y residuos.

Son de gran importancia también las actividades relacionadas con la educación y la formación; en particular, existe un margen para mejorar la actitud empresarial de los investigadores, así como la buena disposición de los ingenieros de producción respecto al cambio. Por otra parte, la realización de una verdadera investigación interdisciplinaria en el área de la nanotecnología requiere nuevos planteamientos de educación y formación aplicables tanto a la investigación como a la industria. Por último, los aspectos sociales (como la información y la comunicación al público, las cuestiones sanitarias y medioambientales, y la

evaluación del riesgo) son otros tantos factores clave para asegurar el desarrollo responsable de la nanotecnología y la satisfacción de las expectativas de los ciudadanos. La confianza del público e inversores en la nanotecnología será crucial para su desarrollo a largo plazo.

La región de Madrid no se está quedando rezagada, sino que se está convirtiendo en un referente, tanto a nivel nacional como europeo, de la investigación en las distintas áreas de conocimiento que abarca las nanociencias y la nanotecnología. Esta tecnología se está convirtiendo en uno de los campos de la I+D cuyas perspectivas de rápida expansión van a dar un nuevo impulso a la consecución de los objetivos de una economía dinámica basada en el conocimiento tal como recogía el Consejo Europeo de Lisboa del año 2000.

Esta apuesta decidida de Madrid por las nanociencias y la nanotecnología se hace patente en el IV Plan regional de Ciencia y Tecnología, donde se recoge como una de las principales líneas científicas tecnológicas, de carácter estratégico para la región, a desarrollar en los próximos 4 años. Asimismo, el IV Plan Regional recoge e impulsa la interrelación entre la comunidad empresarial, grupos de investigación y administraciones públicas y la creación de un Instituto Madrileño de Investigación en nanotecnología. En este sentido, la Dirección General de Universidades e Investigación ha puesto en marcha en este año la convocatoria de ayudas para la realización de programas de actividades de I+D entre grupos de investigación de la Comunidad de Madrid en la que la financiación prevista para el área de nanotecnología, asciende a 7 millones de Euros.

La administración regional participa en el desarrollo del proyecto europeo Nanomat, el cual ha permitido realizar el estudio “nanotecnología en España” en un marco de referencia continental. El proyecto Nanomat es una iniciativa del VI Programa Marco de la Unión Europea, en el que participa la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid, para la realización de estudios de vigilancia tecnológica, realización de proyectos de investigación y formación a países del centro y este su integración en el área de la Nanotecnología entro del Espacio Europeo de Investigación. La situación española alcanza ya casi el 2% de la producción mundial en publicaciones científicas, y tiene en la región de Madrid su máximo exponente.

Reseñas bibliográficas

Reseñas bibliográficas

FECYT (2005) Spain NanoTechnology Think Tank (SNT3, 2004)

Madrid, Especial Nanotecnología, nº 1, febrero.



Partiendo de una atinada reflexión sobre las dificultades que la transferencia de tecnología tiene en el terreno de la Nanotecnología española, el Parque Científico de Madrid, el Parc Científic de Barcelona y la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología han constituido un grupo de trabajo para proponer soluciones a tales dificultades, así como para suscitar colaboraciones entre los profesionales que trabajan en esta área buscando su proyección internacional.

Se creó así el "Spain NanoTechnology Think Tank 2004 (SNT3)", cuya presentación se llevó a cabo en su reunión constitutiva como foro permanente celebrada los días 2 y 3 de diciembre de 2004 en San Lorenzo de El Escorial.

Con el objetivo declarado de crear "un escenario de trabajo para el intercambio de ideas científicas, tecnológicas y empresariales que ayuden a la creación de un sector industrial activo en Nanotecnología", SNT3 es un "laboratorio de ideas" que agrupa a los principales agentes de este sistema fomentando su interacción.

La breve monografía que reseñamos es el fruto de aquella reunión, y permite una buena aproximación a la situación presente de la Nanotecnología en nuestro país.

Los capítulos de la obra (además de un prefacio, la presentación y un anexo con la relación de participantes en el encuentro) revisan lo más destacado de la Nanotecnología en España, la metodología del *think tank*, las conclusiones generales del encuentro, las oportunidades de innovación detectadas y las conclusiones específicas de las distintas sesiones de trabajo realizadas.

Dado que en la reunión constitutiva de SNT3 participaron destacados expertos (procedentes tanto del sector público como del sector privado), los textos que nos ofrecen representan una adecuada panorámica de la situación actual y de las principales líneas de actuación futura en un ámbito científico-tecnológico tan atractivo desde el punto de vista de sus potencialidades como retrasado en cuanto a la actividad nacional.

En la estremecedora llamada de atención que hace Bonifacio Vega García (del Parque Científico de Madrid) sobre la situación actual se señala que España ocupa la vigésima posición –entre los países integrados en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE- en cuanto a desarrollo e innovación en Nanotecnología, contando únicamente con tres empresas activas en este campo. Por si esto fuera poco, en el informe de la Comisión Europea *Hacia una estrategia europea para las Nanotecnologías*, COM (2004) 338, se afirma que España ocupa el último lugar en la Unión (esto es, incluyendo a los países de reciente adhesión) en cuanto a gasto público per cápita en Nanotecnología, con un registro de sólo 0,039 euros, lo que contrasta de manera sangrante con los 5,6 euros de Irlanda, país que más financiación pública dedica a esta materia.

A pesar de tan pobres cifras, la actividad realizada por los científicos y tecnólogos españoles que trabajan en este ámbito resulta ciertamente encomiable, como ponen de relieve los resultados, las ideas y las perspectivas que se recogen en este volumen, que se complementa con un CD-ROM que recoge una muy interesante serie de estudios previos a la reunión de San Lorenzo de El Escorial.

Así por ejemplo, aparece un atinado y útil resumen del informe realizado por el Círculo de Innovación en Microsistemas y Nanotecnología (CIMN), organización fruto de una iniciativa conjunta de la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid y del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial *Esteban Terradas* (INTA). Dicho informe, en su primera versión, vio la luz en 2003, y posteriormente ha sido actualizado en el marco del proyecto europeo NANOMAT (Fundación para el Conocimiento Madri+d).

Este estudio, tras una brevísima presentación metodológica, consta de cuatro apartados, donde se recogen sucesivamente el marco de referencia mundial para la Nanotecnología, las líneas y tendencias actuales que muestra la I+D en Nanotecnología, las instituciones, centros y empresas españolas con actividad en este campo (así como la agregación de sus resultados), y, por último, un análisis sucinto del capital humano más activo en Nanotecnología.

Más adelante, dentro de las "Conclusiones Generales", se incorporan varias propuestas de mejora, entre las que destacamos las siguientes:

- Invitar a grupos de inversores a los trabajos de SNT3, así como especificar la dimensión financiera de las oportunidades de innovación detectadas.
- Reducir el número de temas abordados, así como analizar más en profundidad cuestiones horizontales, tales como la percepción social de la Nanotecnología.
- Dar una dimensión internacional a los grupos de trabajo creados.

Por último, y con respecto a las oportunidades de innovación detectadas, se recogen treinta y tres líneas agrupadas en Aeroespacial y Defensa, Biomedicina y Farmacología, Industria Energética y Electrónica y Materiales. Como complemento, y origen, de estas conclusiones, la monografía detalla de manera bastante minuciosa las labores de los grupos de trabajo. Aquí sería aconsejable, en especial si se considera la necesidad que tiene la Nanotecnología de hacerse visible socialmente, aclarar ciertos términos especializados y cuidar más la expresión escrita. Por ejemplo, en la página 50 se dice que "hay unanimidad en la necesidad de una Foundry española", tras afirmar que ha de mantenerse "el inmenso background que se tiene en microsistemas."

Jesús Rodríguez Pomedá

Reseñas bibliográficas

International Journal of Nanotechnology
Special Issue "On Nanotechnology in Spain", 2(1/2), 2005



Reseñas bibliográficas

Este número doble especial de la revista *International Journal of Nanotechnology* ha sido editado por el Dr. Pedro A. Serena, del Instituto de Ciencia de los Materiales de Madrid (Departamento de Teoría de la Materia Condensada), centro perteneciente al CSIC asociado a la Universidad Autónoma de Madrid.

A lo largo de doce artículos (más el prefacio redactado por Serena) se muestran los resultados más recientes de algunas de las líneas principales de investigación en Nanotecnología en nuestro país.

Tal y como se señala en el citado prefacio, pueden destacarse los siguientes rasgos de la situación presente de la Nanotecnología en España:

- A pesar del importante potencial, tanto científico-tecnológico como económico, que presenta la Nanotecnología, en España los instrumentos de política científica le han dedicado una atención muy limitada. Sólo a partir del Plan Nacional de I+D+i 2004-07 se contempla una Acción Estratégica en Nanotecnología (dotada con poco más de 10 millones de euros por año) orientada hacia una serie de objetivos de medio plazo que necesariamente han de acometerse por equipos transversales constituidos por grupos de investigación básica, aplicada y de desarrollo tecnológico, según indica el doctor Serena. Dado que los primeros proyectos de esta Acción arrancaron en 2005, aún es demasiado pronto para valorar sus resultados. No obstante, puede decirse que el planteamiento descrito resulta en principio adecuado, puesto que parece una forma inteligente de articular y potenciar los recursos de investigación existentes a diferentes niveles del quehacer científico-tecnológico. Si se considera la dinamicidad y transversalidad de la Nanotecnología, este puede ser un buen punto de inicio. Otra opinión puede merecernos la dotación presupuestaria indicada, que no se corresponde con las posibilidades (e inversiones) que otras naciones han visto en este campo.
- A pesar de la relativa juventud de esta corriente de investigación, ya existen en España no menos de 140 grupos de investigación radicados en diferentes Universidades, Organismos públicos de Investigación y empresas privadas. Esta emergente comunidad científica se articula –entre otras iniciativas- gracias a las redes “Nanociencia” y “NanoSpain”, según nos informa Serena. Una de las preocupaciones principales de dichas redes (como no podía ser de otro modo dado el estado de desarrollo de esta comunidad científica) es el intercambio de ideas y experiencias para, posteriormente, provocar la creación de una estructura científico-tecnológica que pueda alcanzar los niveles de excelencia requeridos para insertarse en el Espacio Europeo de Investigación, lográndose así el acceso a fuentes de financiación y otras facilidades propias de este importante instrumento de la política comunitaria de investigación.
- Comienzan a proliferar las reuniones científicas de distinto nivel (seminarios, conferencias, ...) que aumentan la visibilidad de la actividad española en Nanociencia y Nanotecnología. Concretamente, en este número especial del *International Journal of Nanotechnology* que comentamos, aparecen contribuciones derivadas varias presentaciones realizadas en las reuniones que la Red Nanociencia celebró en Barcelona (2002) y en Oviedo (2003). En ellas, así como en su reflejo escrito, se muestra la variedad de los problemas abordados por los *nanocientíficos* y *nanotecnólogos* españoles. Nanomateriales magnéticos avanzados; producción, caracterización y modelización de nanotubos de carbono, o el uso de *nanoherramientas* para estudiar diferentes sistemas biológicos no son sino tres ejemplos de las cuestiones de investigación presentes en esta publicación científica. Los resultados alcanzados nos hacen pensar que ya pudiera existir la masa crítica necesaria para desarrollar en nuestro país unas aplicaciones prácticas acordes con la potencialidad de estas disciplinas.

Por tanto, puede concluirse que, si bien encontramos unas redes científicas capaces de acercar la realidad española a los resultados que alcanzan otras naciones (como los Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, Canadá, Alemania o Francia), seguimos careciendo de instrumentos de transferencia tecnológica eficientes y de una agenda política que sitúe a la Nanociencia y a la Nanotecnología en el lugar presupuestario que les corresponde.

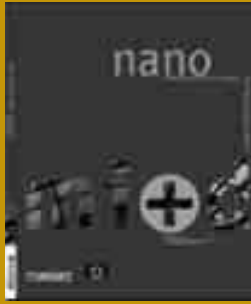
El desarrollo de estas áreas durante los años más recientes puede entenderse como un trasunto de la ciencia y la tecnología española en los últimos tiempos. En efecto, muchas de las características de tal desarrollo no hacen sino replicar a una escala más reducida las virtudes y los defectos más destacados de nuestro devenir científico-tecnológico. Así, por ejemplo, sucede con la excesiva dependencia de los recursos públicos a la hora de financiar los estudios y trabajos de estos campos de conocimiento.

Volvemos entonces a una paradoja muy española: a pesar de los resultados observables en otros países, por encima de lo que aconseja un análisis racional de su potencialidad, el sector privado no acaba de involucrarse en la escala adecuada en la actividad *nano*. Se termina dependiendo en exceso de unas políticas públicas que, aunque bienintencionadas, no llegan a tener el vigor que sería deseable. En el fondo se trata, como no podía ser de otro modo, de un problema de elección cuya respuesta requiere interpretar adecuadamente las conductas y fuerzas de los diferentes agentes que constituyen el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología.

Jesús Rodríguez Pomedá

Reseñas bibliográficas

Nano. Nanotecnología en España (2005)
IV PRICIT, Comunidad de Madrid



El esfuerzo en I+D forma parte ya del discurso sobre la competitividad de las organizaciones y territorios sobre todo teniendo en cuenta el potencial de la cartera tecnológica disponible.

Abundando en esta línea argumental, la convergencia y transversalidad de las tecnologías va cimentando la aparición de nuevas áreas de conocimiento mestizo donde los criterios *bio* y *nano* están generando un soporte cognitivo de alto potencial para múltiples aplicaciones (construcción, medicina, alimentación, medio ambiente, etc.), teniendo en cuenta que lo *nano* se centra en *el control del comportamiento y la estructura fundamental de la materia a nivel atómico y molecular*.

Este planteamiento sintético justifica la importancia del análisis de la realidad nacional alrededor, en este caso, de la nanotecnología, liderando el estudio el grupo configurado alrededor del Círculo de Innovación en Nanotecnología promovido por la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid.

El documento "Nanotecnología en España" se convierte en una referencia significativa para conocer el sentido, alcance y dimensión de los recursos y capacidades que ostenta la nanotecnología española, de ahí que se parta de un marco conceptual que facilita la

comprensión del estudio, explicitando las líneas de interés estratégico que se están desarrollando además de configurar un listado de agentes involucrados en esta área de conocimiento.

Dentro de esta realidad y como resultado del complejo y exhaustivo análisis de publicaciones realizado, la región de Madrid ostenta un lugar relevante en el *ranking* nacional, evidenciándose en toda España un respaldo de carácter público, centrado en las universidades y centros públicos de investigación.

Por otra parte, según dicho estudio bibliométrico, la dimensión internacional de la nanotecnología posiciona a España en el puesto número once y en el quinto dentro del contexto europeo. Estos resultados colocan a España en un importante lugar competitivo que necesita una apuesta decidida tanto en la participación española en los proyectos europeos como en la puesta en marcha de iniciativas dentro de los planes nacionales y regionales.

La posibilidad de consultar el mapa de la nanotecnología en España a través del documento le dota de un interés estratégico fundamental para la agenda de los gestores públicos de cara a promover la mencionada apuesta, sin duda un frente transversal de apoyo a la competitividad de la empresa española.

Reseñas bibliográficas

Fontela, E. y otros (2006)

Convergencia NBIC 2005: El Desafío de la Convergencia de las Nuevas Tecnologías (Nano-Bio-Info-Cogno). Colección EOI, Programa Desafíos, EOI, Fundación Vodafone, Madrid



Se trata de un informe preparado para el llamado “Programa Desafíos de la EOI” por un grupo de expertos, presidido por Emilio Fontela, con Juan de Castro como ponente principal, en el que han participado físicos, biólogos, neurocientíficos, nanotecnólogos, biomédicos y especialistas de las ciencias de la información¹.

El Informe EOI consta de cuatro capítulos:

- En el primero, se introduce el escenario económico y social del futuro, la Sociedad Sostenible del Conocimiento, explicando la transformación necesaria a partir de la realidad presente definida como una Nueva Economía que se apoya en el paradigma tecnológico de la Sociedad de la Información.
- En el segundo capítulo se profundiza en el contenido de la convergencia de las nanotecnologías, las biotecnologías, las infotecnologías y las ciencias cognitivas (la convergencia NBIC) mediante un análisis estructural de estos cuatro nuevos campos del saber científico y tecnológico, y de sus interconexiones.

· En el tercero, el análisis se centra en la realidad española para identificar los potenciales existentes en diferentes planos (el empresarial, el administrativo, el investigador y el universitario) en el área difusa de las tecnologías que intervienen en el posible proceso de convergencia (los temas concretos de la convergencia de las cuatro tecnologías en su conjunto todavía no han sido abordados ni teórica, ni prácticamente, en España).

· Finalmente, en el capítulo cuarto, partiendo de la base de que es el momento oportuno para que España se integre en el pelotón de cabeza del proceso europeo de la convergencia NBIC, se hacen recomendaciones en cuanto a la necesidad de adaptar la educación superior, de estimular la colaboración público-privada y de estimular la participación en el proceso de creación de nuevas iniciativas empresariales.

Los anexos incluyen una metodología de la prospectiva tecnológica (el análisis estructural interpretativo) que se ha utilizado para analizar la convergencia NBIC y una base de información de organismos y de personas potencialmente implicados en los desarrollos de la convergencia NBIC.

¹ Jordi Aguiló (Física y Bioelectrónica, Universidad Autónoma de Barcelona); Javier del Arco (Biología y Filosofía, Fundación Vodafone de España); María Teresa Arredondo (Telecomunicaciones y salud, Universidad Politécnica de Madrid); Ramón Compañó (Física, Materiales y Tecnologías de la Información, Instituto de Prospectiva Tecnológica y Social, IPTS-JRC-CE, Sevilla); Alfredo Fernández (Empresariales, EOI,

Madrid); Ana Morato (Ciencias de la Información y Prospectiva, Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial, OPTI, Madrid); Juan Vicente Sánchez de Andrés (Fisiología y Neurociencias, Universidad de La Laguna, Consejero de la FECYT); Pedro A. Serena Domingo (Física y Nanotecnología, CSIC, Madrid) y Rosa Villa (Biomedicina y Electrónica, CSIC, Instituto de Microelectrónica de Barcelona).

Con otro aire

El Hombre de Flores

“Pequeño y muy listo”

Patricio Morcillo Ortega

Catedrático de Organización de Empresas
Universidad Autónoma de Madrid

“Es la observación, y no la discusión,
lo que hace que una persona cambie de opinión”

Hill Rogers

resumen

Dícese de aquella nanoespecie cuyo grado de inteligencia se podía asemejar a la del Homo sapiens aunque tuviese una capacidad craneal tres veces más pequeña que la de un niño de tres años y similar a la de un chimpancé.

palabras clave

Nanoespecie

Inteligencia

Capacidad de adaptación



En 2003, un equipo de antropólogos descubrió en una gran cueva caliza al oeste de la isla de Flores (Indonesia) siete esqueletos de unos hombres diminutos que allí vivieron hace 12.000-18.000 años. Lo misterioso de esta nueva especie de extraños minihumanos es que no guarda ninguna relación con el Homo sapiens aunque nadie pueda descartar, a pesar de que unos pocos miles de años les separan, que hayan podido coexistir tres especies inteligentes sobre el planeta: el Homo neanderthalensis, el Homo sapiens y el Homo floresiensis.

El Homo floresiensis tenía una estatura en torno al metro de altura, su peso era de 25 kg y su capacidad craneal de 380 cm³, similar a la de un chimpancé. Para los antropólogos, sigue siendo un enigma la sorprendente inteligencia que demostró el hombre de Flores ya que, con una estatura similar a la de un niño de tres años pero con un cerebro tres veces más pequeño, conocía el fuego y fabricaba útiles líticos complejos, refinados y muy evolucionados con una maestría más propia del Homo sapiens que del Homo erectus. Tales hechos podrían hacernos pensar acerca de la relación entre la capacidad craneal y la inteligencia pero es evidente que el saber no ocupa lugar. ¡Adorables criaturas!

Pero, a lo que íbamos, en la formación de los organismos vivos no hay nada que contradiga las leyes de la química y de la física. El planeta tierra se formó, hace ahora unos 4.500 millones de años, y las moléculas, compuestas de átomos, se organizaron en células para que apareciera entonces la vida. Entre el orden de los primates y la familia de los homínidos que, según toda evidencia, debió surgir hace unos cuatro millones de años, afloró, mucho más tarde, esa nanoespecie, la del Homo floresiensis, que tanto nos sorprende y nos hace reflexionar.

Sospechamos que estos minihumanos eran unos listos, en el buen sentido de la palabra porque mientras que nadie aún ha descubierto las causas de la "enanización" (*dwarfing*) y no dejan de organizarse acaloradas discusiones en torno a la importancia del tamaño, ellos tenían superado esta cuestión. Sabían que el Homo grande consumía mucha más energía que

el pequeño y ante esa obviedad renunciaron a crecer puesto que no era requisito imprescindible para sobrevivir.

Los que algún día fueron nuestros vecinos aparcaron a un lado ese cliché tan manido divulgado a bombo y platillo que dice que lo pequeño es bello para concentrarse y acabar por descubrir que lo pequeño es, por encima de todo, útil. En efecto, un reducido tamaño favorece la agilidad, la flexibilidad y, por tanto, la capacidad de adaptación al medio.

Si no fuese porque nos encontramos en España y que no se ha producido ninguna deriva de continentes en éstos últimos 20.000 años podríamos casi asegurar que "*Machaquito*", ese pequeño gran hombre, era un descendiente del hombre de Flores.

Rafael González "*Machaquito*", dio muy pronto sus primeros pasos como matador de toros. Mantuvo una larga y dura competencia con "*Bombita*" y le llamaban "El torero de la emoción". Este apodo no era debido a la edad prematura con la que empezó a hacer sus pinitos en ese difícil mundo de los toros sino a su corta estatura. Su constitución no le permitía "asomarse al balcón" con facilidad y cuando "*El Guerra*" le vio por primera vez, sentenció a su estilo:

· *Pa sé mataó de toros jase farta* verle el morrillo al bicho y a éste le *farta* una cuarta.

A lo que "*Machaquito*" replicó:

· Delante de los toros crezco una cuarta.

Convertido en doctor en Tauromaquia el 16 de noviembre de 1860, a lo largo de su vida toreó setecientas cincuenta y cuatro corridas y alternó con los grandes maestros de su época como "*El Gallo*" y Vicente Pastor. Sobrevivió cuarenta y dos años a su retirada y murió rodeado de sus hijos y nietos con el respeto de los cordobeses que le nombraron tercer califa de la ciudad sucediendo a "*Lagartijo*" y a "*Guerrita*" y precediendo a "*Manolete*".

