

Las nanotecnologías en Uruguay

Adriana Chiancone,
Guillermo Foladori
Coordinadores



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

Interdisciplinarias
2012

Las nanotecnologías en Uruguay.

Adriana Chiancone
Guillermo Foladori
(coordinadores)



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

Interdisciplinarias
2012



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

José Enrique Rodó 1843
11200 Montevideo Uruguay
www.ei.udelar.edu.uy
ei@ei.udelar.edu.uy

Integraron el Comité de Referato para la edición 2012:
Enrique Lessa, Claudio Martínez, María Inés Moraes, José Quijano, Isabel Sans y Judith Sutz

Colección Interdisciplinarias 2012.

Las nanotecnologías en Uruguay.

Coordinadores: Adriana Chiancone, Guillermo Foladori

Álvaro Mombrú, Helena Pardo, Adriana Chiancone, Fabián M. Capdevielle, Lydia Garrido Luzardo, Juan Carlos Benech, Mariana Pereyra, Ramiro Chimuris, Guillermo Foladori, María Brum, Ricardo Faccio, Natalia Oddone, Marcos Tassano, Juan Pablo Damián, Natalia Pi, Ana Inés Zambrana, Dolores Etchegoimberry, Pablo Cabral

Primera edición, setiembre 2013, 500 ejemplares

ISSN

ISBN del volumen 978-9974-0-0961-5

Impreso y Encuadernado en

Mastergraf S.R.L.

Gral. Pagola 1823 - CP 11800 - Tel.: 2203 4760*

Montevideo - Uruguay

E-mail: mastergraf@mastergraf.com.uy

Depósito Legal XXX.XXX - Comisión del Papel

Edición Amparada al Decreto 218/96

Distribución general: Espacio Interdisciplinario, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República, Fondo de Cultura Universitaria.

Las opiniones vertidas corren por cuenta de los autores.

La Colección Interdisciplinarias se rige por la ordenanza de los Derechos de Propiedad Intelectual de la Universidad de la República.

Índice

Prólogo	11
Presentación	13
Capítulo 1	
Nanotecnología y Uruguay.....	17
1.1. Introducción.....	17
1.2. Alcances de la nanotecnología.....	21
1.3. Nanotecnología y Uruguay	21
Capítulo 2	
Historia del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay	27
2.1. Introducción.....	27
2.2. Antecedentes	28
2.3. Marco general de ciencia, tecnología e innovación en Uruguay	30
2.4. Catalizadores del proceso de conformación del Grupo Nanotecnología Uruguay y vinculación de los científicos uruguayos	32
2.5. Panorama general de las nanotecnologías en el Uruguay	34
2.6. Elementos para un plan nacional de nanotecnología	35
2.7. Conclusiones	39

Bibliografía 41

Capítulo 3

Nanomateriales con potenciales aplicaciones tecnológicas desarrollados en el Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química 43

3.1. Introducción..... 43
3.2. Celdas solares fotovoltaicas nanoestructuradas (CSN)..... 43
3.3. Membranas colagénicas para reposición dérmica..... 45
3.4. Sistemas nanométricos para la liberación controlada de fármacos..... 46
3.5. Nanografito 47
 3.5.1. Nanotubos de carbono 47
 3.5.2. Grafito magnético..... 50
3.6. Nanopartículas metálicas 51

Bibliografía 53

Capítulo 4

Nanotecnología: ejemplos y aplicaciones en la utilización de energía solar..... 55

4.1. Introducción..... 55
4.2. Energía solar..... 57
 4.2.1. Celdas solares sensibilizadas con tintas 59
 4.2.2. Tecnologías de capa fina 60
4.3. Producción y fabricación de prototipos en el Uruguay..... 60

Bibliografía 63

Capítulo 5

Materiales biocompatibles: un nuevo desafío de investigación 65

5.1. Introducción..... 65
5.2. Características del titanio..... 66
5.3. ¿Por qué son importantes las características del material? .. 66

5.3.1. Estructura y composición del tejido óseo	67
5.3.2. Materiales biocompatibles	67
5.3.3. Proyecto de investigación	69
5.4. Modificación de la superficie de titanio.....	69
5.4.1. Oxidación del titanio: síntesis de nanotubos.....	69
5.4.2. Síntesis de hidroxiapatita (HA)	70
5.4.3. Pruebas de biocompatibilidad.....	71
5.5. Reflexiones finales	71
Glosario	73
Bibliografía	75
Capítulo 6	
Nanociencia, nanotecnología y nanobiología	79
6.1. Introducción.....	79
6.2. Trabajos de Investigación desarrollados en el IIBCE	81
6.2.1. La $Ca^{2+}Mg^{2+}$ -ATPasa	81
6.2.2. Modulación de la síntesis proteica local	82
6.2.3. Señales de Ca^{2+} en el núcleo celular.	83
6.2.4. Obtención y caracterización de un conjugado dendrímico PAMAM G4 FITC: estudio de su ingreso y distribución en cultivo primario de células miométricas humanas (CMH).....	85
6.3. Microscopía de fuerza atómica: nanociencia, nanotecnología y nanobiología	86
Bibliografía	87
Capítulo 7	
La tercera ola en secuenciación de genomas: instrumentos nanotecnológicos y aplicaciones biotecnológicas	
91	
7.1. Introducción.....	91
7.2. Surfeando las dos primeras olas.....	92

7.3. La tercera ola: integrando nanotecnología y biotecnología ..	93
7.4. Biotecnología genómica: la información del ADN puesta en perspectiva	96
7.5. Explorando oportunidades en la frontera nano-bio	98

Bibliografía 101

Capítulo 8

Interpretaciones y desafíos locales

de la investigación y desarrollo en nanotecnología..... 103

8.1. Introducción.....	103
8.2. Nanotecnología y desafíos en la periferia.....	103
8.3. Crisis y nuevos campos, ¿oportunidades para la innovación?	105
8.4. Construcción de capacidades locales	106
8.5. Estrategias de los investigadores: continuidad e innovación	107
8.6. Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva.....	109
8.7. Conclusiones	110

Bibliografía 111

Capítulo 9

Nanotecnología: continuidad y ruptura..... 113

9.1. Introducción.....	113
9.2. Propiedades de los sistemas a escala nanométrica	116
9.3. Ejemplos de aplicaciones beneficiosas más inmediatas	117
9.4. La convergencia tecnológica	118

Bibliografía 121

Capítulo 10

La propiedad intelectual en el cruce

con la nanotecnología: reflexiones en voz alta 123

10.1. Introducción.....	123
-------------------------	-----

10.2. La nanotecnología.....	124
10.3. El sistema de la propiedad intelectual (PI).....	125
10.4. Cómo se fue adecuando el régimen de propiedad intelectual	130
10.5. Cómo afectan los ADPIC a los países del Tercer Mundo ...	131
10.6. Conclusiones	133
Bibliografía	135
Capítulo 11	
Nanotecnologías para el desarrollo	
en América Latina	
137	
11.1. Introducción.....	137
11.2. Tres concepciones no contradictorias, y en algunos casos complementarias, que caracterizan las políticas y propuestas para nanotecnología.....	138
11.3. ¿Qué han mostrado las nanotecnologías en su primera década de desarrollo?	142
11.4. ¿Qué debe contemplar un enfoque social para el desarrollo de las NT?	143
11.5. Conclusiones	145
Bibliografía	147
Sobre los autores	151

Prólogo

La convocatoria a propuestas de textos para esta colección empieza diciendo: «El Espacio Interdisciplinario (EI) tiene entre sus objetivos estimular encuentros para el abordaje de temas complejos con el aporte de diferentes disciplinas».

Los encuentros que se busca estimular son imprescindibles tanto para hacer avanzar el conocimiento y utilizarlo bien como para contribuir a su democratización; en los tres aspectos, tales encuentros entre disciplinas son cruciales para evitar que la expansión acelerada del conocimiento, rasgo mayor de nuestra época, tenga algunos efectos muy perjudiciales.

La especialización creciente es una consecuencia inevitable de dicha expansión, que se traduce en la multiplicación de disciplinas, muy a menudo necesaria para estudiar en profundidad ciertos fenómenos distintos o ciertos aspectos diferentes de un mismo fenómeno. Sin esa especialización creciente, estructurada en torno a disciplinas sólidamente construidas, se correría el riesgo de enlentecer el avance del conocimiento, de no profundizar en toda la medida de lo posible el estudio y la comprensión de ciertos procesos.

Pero la especialización conlleva el riesgo de la fragmentación del conocimiento, que tiene por lo menos tres consecuencias negativas. Una atañe al conocimiento mismo: parece difícil llegar a conocer realmente algo, por ejemplo, del cambio climático, si no conectamos lo que al respecto nos dicen diferentes disciplinas. Una segunda consecuencia potencialmente negativa se refiere al uso valioso del conocimiento: parece difícil afrontar, por ejemplo, la problemática nutricional e infecciosa de los niños que asisten a las escuelas en barrios carenciados de Montevideo sin conjugar los aportes de variadas especialidades. Una tercera consecuencia que puede tener la fragmentación del conocimiento se relaciona con su democratización; esta

cuestión no siempre recibe atención comparable a las dos anteriores, por lo cual nos detendremos brevemente en ella.

¿Cómo hace un ciudadano «de a pie» para hacerse una idea de lo que conviene a la comunidad en relación a un problema complejo? Los expertos pueden y deben asesorar pero, aunque lo hagan en términos comprensibles para no expertos, sus opiniones se basan en sus especializaciones respectivas, por lo que no necesariamente incluyen un enfoque de conjunto; además, ciertas opiniones de expertos suelen contraponerse a las de otros expertos. En ese contexto, la decisión democrática acerca de problemas complejos se hace muy difícil. La democratización del conocimiento incluye varias facetas; una imprescindible es la de colaborar con la ciudadanía para que pueda hacer un uso informado y autónomo del conocimiento avanzado a la hora de adoptar decisiones sobre asuntos que a todos atañen. Los encuentros y diálogos entre disciplinas pueden contribuir a ello.

La democratización del conocimiento constituye un desafío mayor de nuestra época y una responsabilidad fundamental de una Universidad como la nuestra, que busca conjugar la excelencia académica con el compromiso social. Con la Colección Interdisciplinarias, el Espacio Interdisciplinario de la Universidad de la República procura realizar un nuevo aporte a la democratización del conocimiento. Bienvenido sea.

Rodrigo Arocena

Presentación

A fines del 2009 las nanotecnologías fueron incluidas como un área transversal prioritaria en el PENCTI (Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación: Bases y principales lineamientos). Con esta medida el Uruguay se sumaba a la ya larga lista de países latinoamericanos que desde México hasta Argentina y desde Cuba hasta Chile consideran las nanotecnologías como un área estratégica para el desarrollo.

Pero la decisión política no solo acompañaba a los países de la región, sino que cristalizaba en la política económica lo que varios centros de investigación estaban realizando y mostraban como un camino viable.

En junio del 2010 se creó en Uruguay un Consejo Sectorial en Biotecnología y Nanotecnología, constituido por integrantes del Grupo Directivo Ministerial, técnicos del sector público, empresarios y trabajadores.¹ El trabajo de dicho consejo se ha focalizado en priorizar las medidas más importantes propuestas por el Gabinete Productivo del período anterior, identificar nichos y mercados emergentes para el país en bionegocios, y en la visibilidad, la comunicación y el desarrollo de inteligencia competitiva.

Sin embargo, todavía no hay un programa nacional de apoyo específico a la nanotecnología, con objetivos, metas, líneas de investigación y financiamiento. Para ello es necesario contar con un diagnóstico de lo que existe, elaborar líneas estratégicas de desarrollo para el contexto uruguayo y tener una fuerte visión de largo plazo. En este contexto, el libro que aquí presentamos es un documento base, ya que reúne trabajos de varios investigadores de los diferentes centros que trabajan en nanotecnología y, en su conjunto, constituye un diagnóstico de lo que se está haciendo en materia de nanotecnología en el Uruguay.

1 Ministerio de Industria, Energía y Minería, www.miem.gub.uy.

Este libro tiene un antecedente en el corto plazo. En el ámbito del Programa Vinculación con Científicos y Tecnólogos Residentes en el Exterior, de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), se desarrollaron en abril del 2009 diversas actividades de formación y difusión sobre el tema Nanotecnología y sociedad, con la participación del Dr. Guillermo Foladori (Universidad Autónoma de Zacatecas, México, y ReLANS),² y un conjunto de investigadores locales del área de la nanotecnología y de las ciencias sociales de distintas facultades de la Universidad de la República (UdelaR) y del Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE). En su oportunidad se realizó un curso en el Centro Cultural de España (15 al 17 de abril del 2009), donde con diferentes perspectivas disciplinarias se presentaron los desarrollos locales de nanotecnología y consideraciones de los aspectos legales, éticos, laborales, sociales y ambientales implicados. A aquellas ponencias se han sumado otros artículos de investigadores que trabajan en la problemática. También en aquella ocasión se dictó una conferencia pública en la UdelaR y se presentó el libro de ReLANS *Nanotechnologies in Latin America* (Berlín: Kart Dietz) en la Casa Bertolt Brecht.

La Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (ReLANS), junto con la Comisión Sectorial de Extensión y Actividades en el Medio (CSEAM) de la UdelaR, han venido promoviendo la difusión de las nanotecnologías en Uruguay desde hace varios años. En el 2006 se celebró un primer seminario, organizado por la Rel-UITA,³ la Casa Bertolt Brecht y la Facultad de Arquitectura de UdelaR. En el 2008 hubo un segundo seminario, patrocinado por la Rel-UITA, la Casa Bertolt Brecht y la CSEAM de la UdelaR; también en dicha ocasión la CSEAM organizó una conferencia pública.

El libro comienza con una breve explicación de qué son las nanotecnologías, de su importancia y del papel que podrían tener en Uruguay (Momburú, capítulo 1). El segundo capítulo relata la historia del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay y presenta un mapa de los principales centros donde se realiza investigación (Chiancone, Chimuris y Garrido, capítulo 2). Los cuatro capítulos siguientes explican las investigaciones que se están haciendo en diferentes centros de investigación: en el Centro NanoMat, en el Polo Tecnológico de Pando, de la Facultad de Química de la UdelaR (Pardo, capítulo 3, y Faccio, capítulo 4); en el Laboratorio de Biomateriales de la Facultad de Ciencias y el Laboratorio de Física del Estado Sólido, de la Facultad de Ingeniería

2 ReLANS: Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad, www.estudiosdeldesarrollo.net/relans.

3 Secretaría Regional Latinoamericana de la Unión Internacional de Trabajadores de la Alimentación, Agrícolas, Hoteles, Restaurantes, Tabaco y Afines (Rel-UITA).

(Pereyra, capítulo 5); en el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (Oddone y otros, capítulo 6) y en el INIA (Capdevielle, capítulo 7). En el capítulo 8 se reflexiona sobre la opinión de algunos investigadores uruguayos respecto de las posibilidades del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay (Chiancone, capítulo 8). El siguiente capítulo hace una revisión del surgimiento y el desarrollo de las nanotecnologías como tecnologías convergentes (Brum, capítulo 9). En el capítulo 10 se plantea el tema de la propiedad intelectual con relación a las nanotecnologías (Chimuris y Garrido, capítulo 10). El último capítulo señala un camino para la interrelación de investigación y desarrollo, y producción y consumo en el área de nanotecnologías para América Latina (Foladori, capítulo 11).

Es este un trabajo interdisciplinario en dos sentidos. Por un lado, su objeto de análisis, la nanotecnología, tiene un campo de investigación de naturaleza interdisciplinaria que abarca un muy amplio espectro de temas. Por otro lado, participan en este libro investigadores de diversos campos de conocimiento, quienes aportan desde su particular disciplina a esta mirada sobre el desarrollo y la situación actual de las nanotecnologías en Uruguay.

Adriana Chiancone
Guillermo Foladori
Febrero 2013

Capítulo 1

Nanotecnología y Uruguay

Alvaro Mombrú⁴

1.1. Introducción

La nanotecnología (NT) es una rama de la tecnología en la que se realizan procesos con la materia a una escala nanométrica. Un nanometro o nanómetro es la millonésima parte de un milímetro. Dicho de esta manera, es muy difícil aquilatar la dimensión de referencia, la que da origen al mismo nombre de esta tecnología.

Se podría agregar que casi se ingresa en la zona del tamaño de los propios átomos, pero si bien esta aclaración suena a algo muy pequeño, probablemente no sea suficiente para darse cuenta de la real magnitud de lo que hablamos. Sin embargo, todos tenemos una noción de la pequeñez de las células, que se definen como la menor unidad de los organismos vivos y que todos entendemos como algo muy pequeño. A las células las entendemos como parte de nosotros, pero también hablamos de gérmenes y contagios o infecciones, técnicamente provocadas por bacterias, que son en sí mismas seres vivos unicelulares. Ahora bien, un nanometro es entre mil y diez mil veces más pequeño que una célula promedio, lo que nos dimensiona el tema más claramente.

Cuando hablamos de NT estamos incluyendo todas las tecnologías que tratan de procesos o productos en esta escala, ya sea productos finales o productos intermedios que se usen como precursores, o incluso sustancias que a esa escala favorezcan que tenga lugar una reacción que de otra manera no ocurriría.

⁴ Investigador del Centro NanoMat, Departamento de Experimentación y Teoría de la Estructura de la Materia y sus Aplicaciones, Polo Tecnológico de Pando (PTP), Facultad de Química, Universidad de la República. Correo electrónico: amombru@fq.edu.uy.

La NT como tal puede asignarse al siglo XXI; sin embargo, está basada en descubrimientos realizados en el final del siglo XX. En 1985, un descubrimiento totalmente inesperado marcó el inicio de la era nano. Una publicación en *Nature*, desde la Universidad de Sussex (Reino Unido) —Harry Kroto— y la Universidad Rice de Texas (Estados Unidos) —Richard Smalley y Robert Curl— postuló la existencia de la primera forma molecular conocida de carbono puro. Estos materiales se denominaron *fullerenos* en homenaje al arquitecto Richard Buckminster Fuller, padre de la geodesia en estructuras edilicias. En 1991, Iijima publicó la existencia de nanotubos de carbono, una forma elongada de los fullerenos. En 1993, Reshef Tenne, del Instituto Weizmann, trasladó estos conocimientos fuera del mundo del carbono y obtuvo materiales inorgánicos que se envolvían sobre sí mismos como los fullerenos o los nanotubos de Iijima. Estos tres hallazgos se consideran hitos clave en el proceso de surgimiento de la NT. De hecho Kroto, Smalley y Curl obtuvieron el Premio Nobel de Química en 1996.

Los avances hacia la consolidación de la NT en el siglo XXI han sido tan importantes que ya han superado a varias temáticas emblemáticas en cuanto a cantidad de producción científica. Una muestra de ello se ve en la figura 1, donde se compara la producción científica en la que aparece el término nanotecnología con aquella en fue figura el término biotecnología —sea en el título, en las palabras clave o en el resumen—, hasta 2008 inclusive.⁵ Es muy notorio que a partir del año 2000 la curva gris (que corresponde a nanotecnología) crece dramáticamente y a partir del 2005 supera a la negra (de biotecnología). Debe considerarse que existen muchísimas publicaciones en las que no aparece el término nanotecnología pero sí el prefijo *nano-*, como en nanopartículas, nanotubos o nanoestructura. El problema es que si se comparan las publicaciones que contienen el prefijo *nano-* con las que contienen el prefijo *bio-*, se abarcará con este último un universo de publicaciones que no refieren estrictamente a biotecnología sino que se centran en otras áreas.

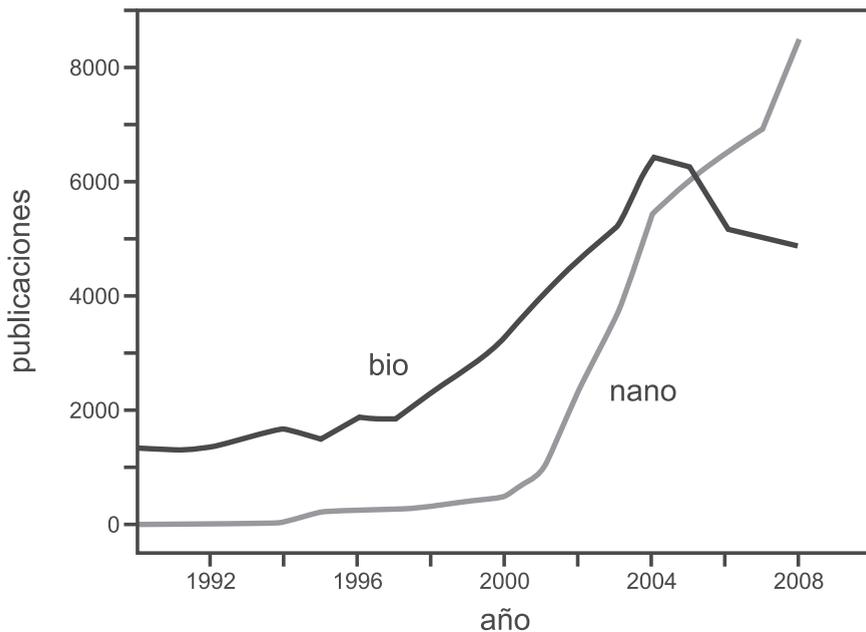
A este aspecto cuantitativo correspondería agregar la aparición de nuevas revistas dedicadas exclusivamente al tema y con altísimo impacto, además de la aparición de artículos de nanotecnología —o nanociencia— en revistas referenciales del más alto nivel, que ya existían.

Aún no destacamos qué es lo que resulta tan importante que ha movilizado una enorme corriente de interés por las potenciales aplicaciones de las NT. Si procesar la materia a la escala nanométrica no incorporara

5 Fuente: Base de datos Scopus, Portal Timbó.

beneficios, poco se hablaría de este tipo de procesos. La gracia de las NT — término más apropiado en plural, aunque nos tomemos la licencia de usar el singular— es que las propiedades de la materia cambian muchísimo. Un material que no conduce corriente eléctrica puede hacerlo si se lo modifica a escala nanométrica. Un material que no es atraído por un imán puede ahora serlo. Un material puede aislar térmicamente, o puede cambiar sus colores o su aspecto. Es decir, sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas u ópticas pueden modificarse por procesos nanotecnológicos, con lo que se producen nanomateriales diferentes a los materiales originales como los conocíamos. Se obtienen materiales más fuertes, más flexibles, mejores. Esta idea, casi olímpica, se traduce directamente en aplicaciones tecnológicas, las de siempre, mejoradas, y las que siempre quisimos desarrollar y no creíamos posible hacerlo.

Figura 1. Comparación de número de publicaciones en las que aparece nanotechnology (gris) o biotechnology (negro), en búsquedas en la base de datos de Scopus (Portal Timbó, ANII), en título, resumen y palabras clave. Período 1990-2008



Estas posibilidades ofrecen campo fértil a la imaginación de quienes pueden diseñar nuevos productos o prestaciones, pero también de quienes con poco fundamento generan expectativas de difícil cumplimiento. Por supuesto que en el terreno de las posibilidades no es muy prudente negarse

desde el principio a que puedan darse determinados avances y rotularlos inapelablemente como mera ciencia ficción; siempre hay que abrir una puerta de duda razonable. Esto es lo que hace muy difícil separar lo que más probablemente resulte ficticio de lo poco probable pero no imposible. La confusión generada por una vorágine de información disponible en Internet pero no filtrada o interpretada constituye una barrera entre una sociedad ávida de conocer los alcances de la NT y la disposición razonable de conocimientos, para que entre todos tomemos las decisiones que resulten mejores en términos de calidad de vida, de trabajo y de progreso.

Esta es una razón, en sí misma más que suficiente, para que Uruguay incursione decididamente en el terreno de la NT a través de la formación de recursos humanos calificados y comprometidos con la sociedad que los prepara. Después de todo, aun en la incorporación directa de tecnologías desde el extranjero, la disposición de técnicos calificados para seleccionar aquella que mejor se adecue a las características nacionales puede implicar un aumento importantísimo de eficiencia, rendimiento y ahorro de divisas.

Sin embargo, como país con interés en lograr desarrollo competitivo, podemos aspirar a metas más elevadas. Se trata de una excelente oportunidad de ser parte de esta movida tecnológica mundial a través del desarrollo de conocimiento propio, que termine en productos comerciales concretos, productos en los que el valor agregado por dicho conocimiento sea elevado y nos permita tener ventajas estratégicas en al menos algunos rubros. Incluso desde una postura menos ambiciosa, con una mentalidad netamente defensiva, resulta imprescindible desarrollar estrategias de prevención respecto de nuestros rubros tradicionales, de origen agroindustrial, ante posibles futuras imposiciones tecnológicas a su exportación. Es importante estar preparados en NT ya que es probable que desde esta rama (o ramas) se genere este tipo de barreras no arancelarias.

Finalmente, a la hora de plantear más razones de peso para avanzar hacia esta tecnología, se puede argumentar la necesidad de medir lo que se importe, a fin de tener un control sobre los nanomateriales que ingresen al país incorporados en productos comerciales. De otra forma nos preocuparemos por la seguridad de los productos propios mientras permitimos que ingresen productos del exterior sin monitoreo alguno respecto de sus características nanotecnológicas.

1.2. Alcances de la nanotecnología

A continuación realizamos un apretado resumen de los alcances que presenta o podría presentar la NT ya en el presente o a corto plazo.

La promesa de la NT en estos días se reparte entre materiales avanzados para hacer la vida diaria más confortable, tanto en vestimenta como en recubrimiento de vehículos o de interiores de refrigeradores, nanoencapsulados para aumentar la aceptabilidad de medicamentos o alimentos, o para estabilizar productos activos, o para dirigirlos en diagnósticos o en el suministro de un fármaco.

Por supuesto, también soluciones energéticas renovables y amigables con el medio ambiente, avances hacia una electrónica más compacta, eficiente y rápida, empaque de alimentos, lubricantes, aislantes térmicos, pinturas especiales y materiales en general con propiedades avanzadas, tanto por características mecánicas como eléctricas, forman parte de la larga lista de aplicaciones que ya se encuentran en el marco de lo posible, lo real y hasta lo ya comercializado. Estas son las ideas más claras al día de hoy, pero es de esperar que estas aplicaciones se multipliquen y se expandan a áreas insospechadas.

Actualmente la opción nano se está barajando en el mundo por todos los líderes de mercado de productos no nano, ya que la conquista previa de una tecnología de estas características por los competidores ya establecidos o en creación puede implicar, a mediano plazo, la pérdida no solo del liderazgo, sino quizás de todo el mercado o buena parte de él. Con barajar nos referimos a invertir muy fuertemente y estudiar muy intensamente.

1.3. Nanotecnología y Uruguay

Si redujéramos la NT a la caracterización del apartado anterior estaríamos omitiendo una discusión importante: en qué sentido esta nueva tecnología emergente y transversal puede afectar a Uruguay y cuál es la mejor estrategia para que ello ocurra de la mejor manera posible.

Lo primero es plantear la gran oportunidad que nuestro país enfrenta. Ya hoy se publica bastante más en nano que en biotecnología (con el discutible criterio ya explicado). Pero ¿qué pasa con patentes, con conocimiento protegido a través de legislación, que —a no olvidarse— es apenas un nivel de referencia para estimar la cantidad del otro conocimiento protegido, el que se mantiene bajo secreto industrial? Si sometemos a biotecnología y nanotecnología a la misma prueba que mencionamos, pero esta vez registramos el número de

patentes, el resultado es sorprendente, o no tanto: patentes con biotecnología, 130 778; patentes con nanotecnología, 7 646.

El resultado no es tan sorprendente porque la biotecnología está en un grado de madurez muy superior a la nano-, pero precisamente eso es lo que se intenta demostrar, solo que cuantificar siempre ayuda a dar una idea de la magnitud de la situación. Incluso teniendo en cuenta que las patentes demoran más tiempo que las publicaciones en salir a luz, por tiempos intrínsecos a cada proceso, la relación es abrumadora. En nanotecnología queda muchísimo por hacer y hay mucho espacio aún para ocupar, y esa es una oportunidad muy grande, que un país como Uruguay no puede desaprovechar.

Lo que ocurrió con la innovación y el desarrollo en semiconductores en la segunda mitad del siglo XX dejó en el ámbito mundial una lección que todos aprendieron. El predominio en esa tecnología, emergente por entonces, se volvió hegemónico, compartido entre muy pocos países, y fue la clave para que países con escasos productos naturales y poco territorio cultivable, como Japón, se convirtiesen en potencias de primerísima línea. El control temprano sobre las patentes que iban apareciendo y el liderazgo en el desarrollo de nuevas tecnologías marcaron una carrera ya ganada para cuando otros países cayeron en cuenta de la importancia y el impacto que tales tecnologías tendrían en el ámbito mundial.

Hoy por hoy la estrategia es generar capacidades en tiempos de calma —entiéndase por calma a los períodos, generalmente largos, en que no surgen nuevos hitos tecnológicos sino que se avanza hacia una evolución pausada e incremental de las tecnologías ya existentes— para que, cuando aparezcan hitos radicales, poder arrancar la carrera sin dar ventajas. Todos los países con pretensiones de desarrollo y liderazgo lo han entendido así y, cuando se presenta este tipo de oportunidades —muy poco frecuentes—, como la NT, en las que el posicionamiento temprano puede dar ventajas y dividendos por muchos años, tienen todas sus baterías prontas para ser competitivos y encontrar sus nichos de destaque.

En NT esta situación ha sido bien clara: prácticamente todos los países arrancaron la carrera con muy poco tiempo de diferencia. Esto podemos compensarlo ahora, actuando sin perder un minuto más, aunque es obvio que la ventaja que ya dimos va a pesar. Hay que invertir fuertemente en ciencia y tecnología en general, siempre, y en NT en particular en estos momentos, cuando es evidente que es la oportunidad emergente y como país nos jugamos tanto. Podría ocurrir que no apareciera otra en treinta o cuarenta años —es arriesgado hacer pronósticos, pero es evidente que estas oportunidades se han dado con muchos años de distancia entre una y otra.

Otra oportunidad la plantea el momento global mundial: la crisis que afecta al planeta no puede sino representar una oportunidad para que Uruguay pueda ubicarse en una posición mejor que la previa de la crisis. No se habla de un posicionamiento notoriamente superior, pero sí mejor, con oportunidad estratégica de salir adelante en innovación tecnológica, aprovechando, entre otras, esta posibilidad que otorga la NT.

Una frase muy usada en estos tiempos, un mundo más ancho y más cercano, muestra una oportunidad más para que Uruguay aproveche la colaboración internacional a fin de crecer en esta área. La necesidad de crear y consolidar redes y bloques científicos y comerciales a escala de la región y fuera de ella se vuelven, en este caso, imprescindibles.

Por último, en referencia al momento oportuno, cabe destacar muy especialmente la habilitación del Portal Timbó por la ANII. Este portal significa un salto cualitativo para el sistema de investigación nacional, que permite que los investigadores e innovadores nacionales se encuentren en un mínimo razonable de competitividad con sus pares del resto del mundo en cuanto a la adquisición de información técnica actualizada. En sí mismo es una herramienta sin la cual plantearse competir en ciencia, tecnología e innovación no pasa de ser una expresión voluntarista, sin conexión con la realidad.

Ahora bien, en el caso de la NT se vuelve imperativa la adquisición de información, pero también el procesamiento razonable de esta para acceder a un nivel de vigilancia tecnológica que permita una jerarquización temática. Esta jerarquización dará elementos para definir estratégicamente aquellos puntos en los que un país como Uruguay pueda hacer el recorrido completo y lograr productos comercializables, competitivos y exportables.

En el mundo se está tendiendo a que grupos o países avancen hacia una especialización en áreas determinadas de la NT, dada la extensión temática que involucra y porque para países de porte mediano resulta inabordable dedicarse a todos los temas o incluso a una mayoría de ellos.

Una adecuada selección de temas para desarrollar innovaciones en NT debe tener en cuenta variados aspectos. Algunos de ellos son claros: la deseable incorporación de productos naturales que otorguen una ventaja estratégica, el uso de materias primas nacionales con ventajas comparativas, el cuidado del medio ambiente, etcétera. Sin embargo hay otros aspectos que debemos acostumbrarnos a pensar dándoles similar importancia: cantidad de valor agregado en la producción, sustentabilidad de la producción, detección de nichos donde poder desarrollar una tecnología, sea de producto terminado o de partes para ensamblar con otras, y, por supuesto, obtención actualizada de información en propiedad intelectual sobre el producto de interés.

En ese sentido en el Centro NanoMat hemos enfocado nuestra investigación hacia tecnologías para celdas solares fotovoltaicas con base en nanomateriales, el desarrollo de biomateriales de reparación y regeneración tisular en reposición de material esquelético o de piel, el encapsulamiento de productos para nutrición, cosmética o sanidad animal, y el agregado de nanomateriales a matrices de materiales o productos convencionales. Sin descartar otras temáticas, se encuentra a la vista, como una etapa posible, el uso de nanopartículas para el tratamiento de efluentes o incluso en materiales de construcción.

Se buscan temáticas que cumplan con las condiciones descritas, con un aspecto adicional que resulta crucial: su viabilidad. Siempre habrá tiempo para encarar situaciones complejas. Sin embargo, a estas alturas, en que la NT emerge como una promesa, una condición fundamental es que sus frutos sean vistos por la sociedad en su conjunto, lo antes posible. Es fundamental que se pase de la promesa a la realidad, al menos con un emprendimiento que alcance comercialización y dividendos. Ello, además de legitimar esta tecnología ante la opinión pública, tendrá el efecto contagio necesario para crear un círculo virtuoso capaz de mover la pesada rueda que generalmente se asocia a una novedad productiva.

Por supuesto, es muy importante tener en cuenta aspectos sociales si se quiere que la NT despierte el apoyo y la simpatía social imprescindibles para ser considerada una estrategia país.

Un aspecto que es difícil de precisar a priori por quienes trabajan en esta disciplina tiene que ver con el impacto sobre las condiciones laborales de la población. Es posible que una tecnología tan radicalmente diferente impacte a la baja sobre el número de puestos de trabajo, respecto de la producción ya existente. Sin embargo, en el caso de Uruguay, con una producción industrial más limitada que en otros países, es muy probable que este aspecto no sea de peso, sino que, a la inversa, se ganen puestos de trabajo por la incursión en sectores productivos hoy inexistentes o escasamente abordados, ampliando el sector de manufacturas nacionales. La sensación es que en ese sentido hay mucho más para ganar que para perder.

El otro aspecto tiene que ver con la seguridad de la producción y la confianza que la sociedad debe tener de que esta tecnología no deje secuelas negativas de ningún tipo sobre la calidad del medio ambiente o la salud de los uruguayos, ya sea que trabajen en este tipo de producción o que la consuman.

Para ello es muy importante que quienes trabajen en NT sean conscientes de la responsabilidad que ello implica y hagan esfuerzos para estar a la altura de las circunstancias de este momento, cuando un error en

este sentido, por menor que sea, puede revertir el proceso de avance que se está iniciando.

Para Uruguay llegó el momento. Estamos seguros de que de iniciativas como las que se intentan en el NanoMat o en otros laboratorios, en otras instituciones o en empresas privadas o estatales, crecerá una nueva y muy innovadora rama productiva que generará empleo y bienestar general.

Capítulo 2

Historia del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay⁶

Adriana Chiancone⁷, Ramiro Chimuris⁸ y Lydia Garrido Luzardo⁹

2.1. Introducción

Este trabajo se enmarca en un esfuerzo colectivo por estudiar el desarrollo de las nanotecnologías (NT) en la región, y en Uruguay en particular, así como el posicionamiento de los diversos actores implicados, frente a las ventajas, los riesgos y desafíos que estas tecnologías disruptivas representan. Presentamos en esta oportunidad el desarrollo de las NT en Uruguay y destacamos la pertinencia de un abordaje de la tecnociencia que considere los aspectos éticos, legales y sociales, incluidos los impactos económicos y los riesgos a la salud y ambientales.

El artículo comienza con la presentación de algunos antecedentes sobre los recientes desarrollos de las NT. A continuación, con el objetivo de contextualizar el desarrollo de las NT en Uruguay y su inclusión en la agenda pública, se plantea un breve panorama actual de la ciencia, tecnología e innovación en el país. Una mirada a la dinámica local nos permite detectar el rol catalizador de diversos actores para la vinculación de los investigadores uruguayos y para la conformación del Grupo Nanotec-Uruguay (GNanotec-Uy), así como para el establecimiento de colaboraciones científicas regionales. En

6 Este capítulo incorpora una actualización del trabajo que apareció en el libro *Nanotecnologías en América Latina*, compilado por G. Foladori y N. Invernizzi (México: Porrúa, 2007).

7 Docente e investigadora de la Universidad de la República. Investigadora del SNI-Uruguay. Miembro de la ReLANS. Correo electrónico: achiancouniversidad@gmail.com.

8 Doctor en Derecho y Ciencias Sociales, miembro de Plataforma DESCAM (Plataforma de Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Medioambientales). Miembro de la ReLANS. Correo electrónico: ramirochimuris@gmail.com.

9 Investigadora de Plataforma DESCAM. Miembro de la ReLANS. Correo electrónico: lydiagarrido@gmail.com.

el marco de un abordaje de los aspectos éticos, legales, sociales y ambientales, se plantean algunas propuestas relativas a la construcción de oportunidades de los practicantes del campo, así como también ciertos lineamientos básicos para el diseño de políticas de ciencia, tecnología e innovación en Uruguay relacionadas con las NT.

Este trabajo está basado fundamentalmente en entrevistas a informantes calificados, así como en un conjunto de fuentes que constituyen las primeras comunicaciones locales sobre un muy reciente proceso que tiene lugar en el Uruguay.

2.2. Antecedentes

Las NT llegan como la tecnología de mayor espectro de aplicación, por lo que prácticamente todos los ámbitos en los que se desarrolla la vida humana pueden llegar a ser alcanzados por ellas. La novedad esencial de las NT es que la materia muestra diferentes y novedosas propiedades cuando se manipula en la escala entre 1 y 100 nanómetros. Una de esas características es, por ejemplo, que los productos que incorporan nanopartículas pueden tener una altísima sensibilidad, comportarse de manera «inteligente» y hacerse más eficientes que con tecnologías tradicionales utilizando elementos del entorno de forma novedosa. Otra característica es que la frontera entre lo vivo y lo no vivo se borra, al abrirse la posibilidad de combinar nanopartículas inanimadas con organismos vivos o emplear elementos vivos para usos artificiales.

Esa posibilidad es hoy una realidad, y eventos tales como la creación del primer organismo autorreplicante por el Instituto J. Craig Venter y Synthetic Genomics Inc., en el 2010, llevan asociados fuertes cuestionamientos acerca de la ética de construir vida artificial y las implicaciones del campo de la biología sintética (ETC Group, 2010).

Los estudios de los aspectos éticos, legales y sociales (ELSA) de la ciencia y la tecnología (C+T) tienen por objetivo internalizar y evaluar los diversos impactos de C+T sobre el ser humano (individual y socialmente) respecto a sus actividades económicas, culturales, en el trabajo, en la salud, etcétera.

Los estudios ELSA, tal como son conocidos en el ámbito internacional,¹⁰ podrían ser denominados, usando la misma sigla, estudios *éticos, legales, sociales y ambientales*, para incorporar una categoría ecosistémica en el abordaje del análisis.

¹⁰ *Ethical, Legal and Social Aspects* (ELSA), 'aspectos éticos, legales y sociales'; también se utiliza la expresión *Ethical, Legal and Social Issues* (ELSI), 'implicaciones éticas, legales y sociales'.

Es necesario tener en cuenta las propiedades que diferencian la escala nano. Oswaldo Luiz Alves, profesor titular del Instituto de Química de la Unicamp (Brasil), expresaba en una entrevista en el año 2007:

[...] las preocupaciones con las nuevas tecnologías son absolutamente legítimas y deben formar parte de las discusiones, tanto de la academia como del sector productivo, el gobierno y la sociedad. Con la nanotecnología no es diferente, dado su carácter innovador, que introduce nuevos paradigmas abre y amplía de manera notable las posibilidades. Es claro que las aplicaciones esperadas pueden presentar situaciones extremadamente conflictivas y discutibles, e inclusive situaciones de riesgo [...]; en relación a otros riesgos, gran parte de ellos tienen que ver con estar trabajando con entidades de tamaño diminuto que, como dije inicialmente, pueden tener sus propiedades fuertemente alteradas por causa de su escala y forma (Alves, 2007).¹¹

Los estudios sobre aspectos éticos, legales y sociales (ELSA) son necesarios a la hora de analizar la C+T, en virtud de los potenciales impactos sociales, culturales y económicos que las nanotecnologías generarán sobre el hombre y su medioambiente (tanto positivos, como negativos). Según un dictamen sobre los aspectos éticos de las NT que fue publicado hace unos años por el Grupo Europeo de Ética de la Ciencia y de las Nuevas Tecnologías de la Unión Europea, es importante llevar a cabo más investigaciones sobre las implicaciones ELSA. El informe recomendaba que hasta un 3 % del presupuesto de investigación en NT se destinase a dicha investigación. Los autores reclamaban a la Comisión Europea la creación de una Red Europea específica sobre Ética en Nanotecnología, que sería financiada a través del Séptimo Programa Marco (7PM). En la red se darían cita expertos procedentes de una variedad de campos, se fomentaría una mayor comprensión de las cuestiones éticas que surgen de las NT y la nanomedicina, se promocionaría la educación en estos campos y se trabajaría para garantizar que la ética se incluya en las prácticas de investigación sobre nanomedicina y nanotecnología (CORDIS, 2007).¹²

11 En dicha entrevista el especialista en NT indicaba que Brasil tiene la capacidad científica y las facilidades para la investigación en NT. Para ello es preciso acoplar a las NT y las políticas públicas en un marco regulatorio para el sector.

12 La Comisión Europea gastó más de 1360 millones de euros en investigación sobre NT a través del Sexto Programa Marco. El presupuesto de NT en el Séptimo Programa Marco es de 3500 millones de euros.

2.3. Marco general de ciencia, tecnología e innovación en Uruguay

Las actividades de investigación y desarrollo (I+D) en Uruguay se realizan mayoritariamente en el sector público, donde tiene una presencia dominante la Universidad de la República (UdelaR), única universidad pública del país. Esta concentra más del 70 % de los recursos humanos de investigación y aproximadamente una tercera parte del gasto en C+T (RICYT, s/f).¹³

También tienen importante participación en esta materia diversos organismos del sector gubernamental, con especial destaque del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE).

Las autoridades del gobierno que asumió en marzo del 2005 evaluaron negativamente la situación de la ciencia, tecnología e innovación (CTI) en el país, caracterizada por una asignación de fondos muy reducida para las actividades de I+D y la discontinuidad del financiamiento de los instrumentos para promoverlas. El último dato sobre la inversión nacional en I+D como porcentaje del PBI fue publicado para el 2009 y alcanzaba solo el 0,41 % (RICYT, s/f). El gobierno se propuso que esta inversión llegue al 1 %, siguiendo recomendaciones de la UNESCO y por medio de diversas acciones que impliquen mayor compromiso del sector privado.

Cabe también destacar la alta fragmentación detectada en el sistema nacional de innovación, con una débil articulación entre la oferta y la demanda de conocimientos científico-tecnológicos (salvo en el sector agropecuario), así como también con una escasa demanda de conocimiento creado localmente. Esta fragmentación manifestaba, en cierta medida, la inexistencia de una política pública de CTI, que las autoridades competentes se han propuesto institucionalizar.

En la nueva institucionalidad existen cuatro niveles: 1) estratégico; 2) operativo; 3) de asesoramiento y consulta social, y 4) de beneficiarios de programas (Gabinete Ministerial de la Innovación, 2009).

En el nivel estratégico, el Poder Ejecutivo, a través del Gabinete Ministerial de la Innovación (GMI) —figura institucional inédita en Uruguay—, tiene el rol de definir las grandes líneas estratégicas en materia de CTI. El GMI está integrado por ministros y representantes del Poder Ejecutivo (de

13 El valor (80,81 %) que aparece en la página citada corresponde para el año 2009 al sector Educación Superior. Este sector incluye, además de la UdelaR, a las cuatro universidades privadas y otras instituciones en las que las actividades de I+D son, en términos cuantitativos, mucho menores que en la universidad pública. El conjunto de investigadores locales pertenece mayoritariamente a la UdelaR.

los ministerios de Ganadería, Agricultura y Pesca; de Industria, Energía y Minería; de Economía y Finanzas; de Educación y Cultura, y de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto).

En el nivel operativo, la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) es el ente ejecutor de las políticas y asesor del Poder Ejecutivo en materia de instrumentos y programas para la promoción y el fortalecimiento de la (CTI).¹⁴

En el tercer nivel, de asesoramiento y consulta social, tienen un rol decisivo diversos actores por medio de un nuevo Consejo Nacional de Innovación, Ciencia y Tecnología (CONICYT). Este asesora a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y a los poderes Ejecutivo y Legislativo.

En el cuarto nivel se encontrarían aquellos actores que producen conocimiento y desarrollan procesos innovadores, quienes serían los beneficiarios de los diversos programas: grupos de investigación, instituciones, empresarios, etcétera.

Un estudio sobre la situación y perspectivas de la CTI en Uruguay, financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y desarrollado por investigadores de la UdelaR, caracterizó la situación en la que se encontraba Uruguay como de «indigencia innovadora» (Bértola y otros, 2005). Esta caracterización se basa en un muy bajo desempeño productivo, una débil cultura innovadora y la escasa articulación de los actores.

El gobierno había expresado un especial interés en la generación de estrategias para el estímulo al desarrollo tecnológico que exige aprovechar el potencial de innovación del país, en pos de fortalecer la competitividad productiva y mejorar la capacidad de desarrollo científico-tecnológico (PDT, s/f). En el 2005 fue definido un conjunto de áreas prioritarias para el desarrollo y la inversión en C+T: cadenas agroindustriales (cárnica, láctea, arrocera, granjera, forestal, pesquera); complejo turístico; biotecnología y farmacéutica (salud humana, salud animal y fitosanitarios); alternativas energéticas; tecnologías de la información y la comunicación, y recursos naturales y medio ambiente. Cuatro años más tarde, en el contexto de la presentación pública del Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCTI) — que se basa en las consultas realizadas a los múltiples actores implicados—, las NT serían incluidas en el documento de bases y lineamientos PENCTI como un área transversal prioritaria (Gabinete Ministerial de la Innovación, 2007).

14 El 19 de diciembre de 2005 por la Ley de Presupuesto Nacional 2005-2009, n.o 17930, artículo 256, se creó la Agencia Nacional de Innovación. El 28 de diciembre de 2006, por la ley n.o 18084, se le cambió el nombre por el de Agencia Nacional de Investigación e Innovación y se establecieron sus cometidos y competencias orgánicas.

El 25 de febrero del 2010, el PENCTI fue aprobado por el decreto presidencial 82/010 (Gabinete Ministerial de la Innovación, 2010).

2.4. Catalizadores del proceso de conformación del Grupo Nanotecnología Uruguay y vinculación de los científicos uruguayos

En el 2006 se creó el Grupo Nanotecnología Uruguay (G-Nanotec-Uy), integrado por los investigadores que trabajan en el campo de las NT en el país.¹⁵ Entre los factores relevantes para la conformación y consolidación del G-Nanotec-Uy debe destacarse la labor desempeñada por diversos actores en una sucesión de hechos que significaron considerables estímulos y avances:

- La identificación de los practicantes del campo, realizada por la periodista Daniela Hirschfeld, quien detectó a los diecisiete investigadores que desarrollaban actividades en NT en el país, dispersos en distintas unidades académicas montevideanas. Ese relevamiento fue muy próximo al seminario sobre impactos e implicaciones sociales y económicas de las NT dictado por el Dr. Guillermo Foladori, coordinador de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (ReLANS), quien visitaba Montevideo.¹⁶ Este seminario fue organizado por la Secretaría Regional Latinoamericana de la Unión Internacional de Trabajadores de la Alimentación, Agrícolas, Hoteles, Restaurantes, Tabaco y Afines (Rel-UITA), la Casa Bertolt Brecht y la Facultad de Arquitectura (de la UdelaR), lo que representa una expresión del interés de diversas instituciones y organizaciones sociales por los impactos e implicaciones sociales de las NT, de manera casi simultánea al establecimiento de contactos entre los científicos del campo. Como resultado de este seminario se formó un grupo de científicos sociales que ingresaron como miembros a la ReLANS (www.estudiosdeldesarrollo.net/relans).

15 En el año 2006 había quince investigadores en nanotecnología, y en el 2008, veintiocho (Gabinete Productivo, 2010: 22).

16 Con el fin de cubrir la sección de «Ciencia» del semanario *Búsqueda*, la periodista entrevistó al Grupo NanoMat de la Facultad de Química y, posteriormente, relevado los investigadores locales del campo. Durante el relevamiento, Hirschfeld se informó acerca del seminario sobre NT dictado por Guillermo Foladori, con quien se comunicó vía correo electrónico (comunicación telefónica de los autores con Daniela Hirschfeld 3/9/2007). El seminario *Nanotecnología: la próxima revolución tecnológica* tuvo lugar en la Facultad de Arquitectura de la UdelaR, Montevideo, del 26 al 27 de mayo de 2006. El relevamiento realizado por Hirschfeld fue publicado por el semanario *Búsqueda* el 8 de junio de 2006 (pp. 32-33). Junto a este artículo se publicó la nota basada en la comunicación con Foladori a través de Internet.

- El rol que tuvo la Sociedad Uruguaya para el Progreso de la Ciencia y la Tecnología (SUPCYT) como catalizador del proceso de aglutinación de los investigadores, y la creación del grupo G-Nanotec-Uy, con una primera publicación colectiva en la revista Uruguay Con Ciencia de SUPCYT, en la que el equipo presentó sus integrantes, líneas de investigación y características del campo en Uruguay (G-Nanotec-Uy, 2006).
- El seminario Nanotecnología: oportunidad para grandes innovaciones, organizado con el objetivo de presentar a los empresarios, investigadores y universitarios los desarrollos locales en ese campo y las posibilidades asociadas. El evento tuvo lugar el 28 de septiembre del 2006, organizado por SUPCYT, Fundación Zonamérica y la Cámara de Industrias del Uruguay.
- El proceso de apoyo al G-Nanotec-Uy realizado desde febrero del 2007 por el Centro de Gestión Tecnológica (CEGETEC) de la Cámara de Industrias del Uruguay. CEGETEC buscaba promover la vinculación entre los generadores de conocimiento y la industria, así como el fortalecimiento institucional a través de redes nacionales e internacionales. El trabajo con el grupo uruguayo se inscribía en un proyecto financiado por el Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT)¹⁷ que incluía las áreas de nutraceuticos, dispositivos biomédicos y nanotecnología.¹⁸ El acompañamiento al G-Nanotec-Uy se daría en diversos niveles y a través de diferentes actividades que fundamentalmente consistían en:¹⁹ a) el aporte a la visibilidad local y regional del grupo a través de participación activa en diversos eventos, como el Encuentro NanoMercosur Ciencia, Empresa y Medio Ambiente, realizado en Buenos Aires (7 al 9 de agosto del 2007) y el seminario taller Fortalecimiento de la relación universidad-empresa con apoyo de cooperación internacional en Montevideo (11 al 13 de julio del 2007; Universia, 2007); b) el

17 El PDT era un programa de desarrollo tecnológico financiado con fondos públicos, parte de los cuales corresponden a endeudamiento externo y son obtenidos a través del Banco Interamericano de Desarrollo. El PDT era ejecutado en la órbita del Ministerio de Educación y Cultura.

18 Entrevista realizada a la directora de CEGETEC el 6/8/2007.

La elección de las áreas se basó en la diversidad de los sectores industriales así como en sus diferentes grados de desarrollo en el país. En el caso de las NT, en las que no existen tales desarrollos locales, aparecería como especialmente relevante la vinculación de las capacidades existentes, tarea a la que se ha dedicado este centro. Los *nutraceuticos* son aquellos alimentos que se proclaman como los que poseen un efecto beneficioso sobre la salud humana. A menudo se denominan también *alimentos funcionales*. El término puede aplicarse además a compuestos químicos individuales presentes en comidas comunes como algunos fotoquímicos (<http://es.wikipedia.org/wiki/Nutraceutico>).

19 Entrevista realizada a la directora de CEGETEC el 6/8/2007.

estímulo a los intercambios científicos y el fortalecimiento de las capacidades locales; c) la vinculación con el sector empresarial uruguayo. A partir de la identificación de cinco empresas locales innovadoras se realizaron reuniones de presentación de científicos y empresarios y se intentó concretar oportunidades de trabajo conjunto para tres de los quince investigadores que integraban el grupo en ese momento. Esta labor de relacionamiento exigió a los técnicos de este centro realizar un trabajo de *coaching*, que implicaba traducir diversas lógicas, intereses y expectativas para facilitar la comunicación entre los participantes y promover acuerdos y alianzas estratégicas.

Diversas iniciativas llevadas a cabo por los investigadores uruguayos de NT han conducido a mejorar las condiciones de trabajo local, las perspectivas de desarrollo y de formación de recursos humanos, así como también han contribuido al crecimiento de los nexos internacionales. La selección de un grupo de Uruguay junto con otros de los países de la región en el concurso del 7.º Programa Marco de la Unión Europea, la obtención de fondos concursables para proyectos del área de energía de la convocatoria ANII-ANCAP y la creación de un ámbito de trabajo en el Espacio Interdisciplinario de la Universidad de la República son algunos hechos relevantes del proceso de construcción de capacidades científico-tecnológicas en el campo en cuestión.

2.5. Panorama general de las nanotecnologías en el Uruguay

Las principales investigaciones y los desarrollos en el campo de las NT comenzaron a ser realizados por integrantes de G-Nanotec-Uy, un grupo multidisciplinario constituido por equipos de distintos laboratorios de la UdelaR y del Instituto Clemente Estable.

Actualmente esos equipos, junto con otros nuevos, forman parte del Centro en Nanotecnología y Química y Física de Materiales, aprobado por el Consejo Directivo Central (CDC) de la UdelaR, en el marco del Espacio Interdisciplinario.

Los grupos locales provienen de diversas ramas de la química, física, bioquímica e ingeniería y su trabajo se ha orientado a algunos problemas vinculados con la Nanotecnología. Con el objetivo de mapear las temáticas abordadas por los investigadores locales, presentamos a continuación los principales grupos que trabajan en ese campo, las temáticas y líneas de investigación. Hemos utilizado para esta tarea los sitios de las instituciones en las que se llevan a

cabo actividades de I+D en el Uruguay, y el curriculum vitae (CV Uy) del conjunto de investigadores categorizados del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII). Por lo tanto, los grupos presentados en la tabla a continuación son aquellos grupos cuyo trabajo ha sido identificado por los propios investigadores, como incluido en el área de la Nanotecnología en los sitios consultados (Ver Tabla 1). Puede observarse que la mayoría de los grupos pertenecen a distintas facultades de la Universidad de la República. Las temáticas y líneas de trabajo son diversas, y puede apreciarse una destacada importancia de la (I+D) en nanomateriales. (Chiancone, 2012)

Además de la información que aparece en la tabla, existe una iniciativa en el campo de la biotecnología que está incursionando en la secuenciación e interpretación genómica de especies y comunidades para fines productivos (véase el capítulo 7 de este libro); también investigadores de ciencias sociales asociados a la Universidad de la República, que trabajan en las políticas públicas de nanotecnología e impactos sociales. Artículos sobre los proyectos de gran parte de estos grupos integran este libro.

2.6. Elementos para un plan nacional de nanotecnología

En Brasil el gobierno apoyó la formación de varias redes de investigación en NT desde el 2001, y tiene un programa de nanociencia y nanotecnología que es parte del plan nacional de desarrollo. México desde el 2002 considera a las NT como sector estratégico en su Programa de Ciencia y Tecnología. Chile financia proyectos de investigación en NT desde 1999. Argentina creó la Fundación Argentina de Nanotecnología en el 2005 (Foladori, 2006).

El desarrollo de las NT en Uruguay está avanzado. Una política gubernamental innovadora y responsable que considere los beneficios y los riesgos de las NT para la sociedad en múltiples aspectos (de salud, económicos, culturales, de trabajo, éticos, ambientales, etcétera) sería muy importante para estas convergencias multidisciplinares de las ciencias, las tecnologías y la sociedad en el actual estadio del siglo XXI.

Los principios jurídicos de prevención y precaución cobran una destacada dimensión frente a situaciones en la escala nano. Es decir, existe un poder-deber de los Estados, de las instituciones públicas y privadas y de los ciudadanos de ejercitar los distintos mecanismos legales, administrativos o judiciales que respalden los derechos y garantías de la población en las distintas situaciones de la vida cotidiana (en la salud, el trabajo y el medioambiente,

Tabla 1. Principales grupos que trabajan en Nanotecnología en Uruguay

Institución	Laboratorio / departamento / instituto	Nombre del grupo	Temática relacionada con NT	Líneas de (I+D) relacionadas con NT
Universidad de la República				
Centro Universitario de la Regional Este (CURE)	Centro de actividades integradas en ciencia y tecnología de materiales y su aplicación en el medio ambiente	Grupo de Semiconductores Compuestos		Nanoestructuras de yoduros de metales pesados
Facultad de Ciencias	Departamento de Radiofarmacia - Radioquímica / Centro de Investigaciones Nucleares (CIN)	Oncología Nuclear	Nanopartículas (liposomas dendrímeros) con aplicación en oncológica	Diseño de nanovehículos para el transporte de radionucleidos.
Facultad de Ciencias	Unidad de Bioquímica Analítica (CIN)			Síntesis de nanodispositivos para la modificación de superficies
Facultad de Ciencias	Laboratorio de Biomateriales / Instituto de Química Biológica			Bases moleculares del biorreconocimiento en apatitas nanoestructuradas
Facultad de Ingeniería	Laboratorio de Física del Estado Sólido / Instituto de Física			Fabricación y modificación de materiales semiconductores nanoestructurados para aplicaciones en celdas solares
Facultad de Ingeniería	Laboratorio de Caracterización Óptica / Instituto de Física	Grupo de Física del Estado Sólido	Propiedades ópticas de materiales compuestos nanoestructurados para diferentes aplicaciones	Nanoestructuras metalodielectricas, nanohilos metálicos y semiconductores, nanoporos
Facultad de Ingeniería	Departamento de Ingeniería de Materiales		Nanomateriales Materiales para aplicación en nanomedicina	Brushes poliméricos Modificación de superficie de hidrogeles, nanopartículas y biosensores Filmes ultradelgados

				Nanotecnología computacional	
Facultad de Química	Departamento de Teoría y Experimentación de la Estructura de la Materia y sus Aplicaciones (DETEMA)	Grupo de Nanotecnología Computacional y Química Computacional	Nanotecnología computacional	Nanotecnología computacional	
Facultad de Química	Laboratorio de Cristalografía, Estado Sólido y Materiales, DETEMA, Polo Tecnológico de Pando	Centro NanoMat	Diseño, simulación y síntesis de nuevos materiales avanzados (nanomateriales)	Celdas fotovoltaicas solares nanotecnológicas Piel sintética, nanoencapsulados, materiales compósitos Sistemas gráficos nanoestructurados	
Facultad de Química	Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos	Nanotecnología Alimentaria	Generación y caracterización de nanosistemas para incorporarlos a matrices alimentarias y mejorar la absorción de moléculas bioactivas	Desarrollo de nanosistemas para ser incorporados en alimentos Utilización inteligente de compuestos bioactivos Aplicación de UHPH en fluidos alimentarios	
Facultad de Odontología	Fisiología General y Bucodental	Función Craneomandibular y Dolor Orofacial	Nanotecnología aplicada a materiales de uso médico-odontológico	Desarrollo de un polimérico creado mediante nanotecnología	
Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE)					
Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable	Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología / División Neurociencias		Nanobiología. Nanoprocesamiento. Señalización celular	Nanobiología. Microscopía de fuerza atómica. Nanotecnología en sistemas biomiméticos	

Fuente: Chiancone, 2012.

entre otros). A la hora de regular, es importante que los principios que los inspiran respondan a la salvaguarda de los derechos de las personas de forma integral y prioritaria por sobre las tendencias de mercado. En el Anuario GEO (Global Environment Outlook) 2007, presentado en Nairobi el 5 de enero del 2007, se hacía mención explícita a esta preocupación:

Las nuevas oportunidades y los riesgos tecnológicos: la nanotecnología. [...] Esta tecnología representa actualmente alrededor de 0.1 % de la economía manufacturera mundial y se espera que domine 14 % (2.6 billones de dólares) del mercado en 2014 [...] No se sabe si los marcos normativos vigentes son adecuados para lidiar con las características particulares de la nanotecnología [...] Es necesario adoptar un enfoque equilibrado para maximizar los beneficios al tiempo que minimizar los riesgos. (PNUMA, 2007)

Llamamos la atención de algunas corrientes que pretenden regular después de que ocurran accidentes que demuestren el riesgo de la tecnología. Este no es el espíritu del principio de precaución, que se basa en la necesidad de que las NT, en este caso, demuestren que sus riesgos son menores que sus beneficios antes de que los accidentes se produzcan. Una política de NT debería elaborarse a la luz de los aspectos ELSA, analizando los beneficios y los riesgos (no desde una perspectiva de utilidad financiera, sino de finalidad social). Para ello deberían participar en forma multidisciplinar los especialistas, profesionales de las ciencias naturales y de las ciencias sociales, como así también las organizaciones de usuarios y consumidores.²⁰

Dado el reducido tamaño geográfico, de población y de desarrollo económico, las posibilidades locales de competencia en el campo de las NT, en términos cuantitativos, son escasas. Sin embargo, la opción por desarrollar la capacidad de los científicos podría ser potenciada y poner al país al frente de otros de América Latina, y en consonancia con las posturas internacionales más avanzadas si se incluye análisis ELSA en todas las investigaciones de NT. Como el avance de las NT es muy acelerado, la demora aumentará la brecha, inclusive respecto de otros países en vías de desarrollo.

Un plan nacional de NT debería, además de priorizar las investigaciones que mejor respondiesen a la satisfacción de necesidades sociales (sin limitarse a la justificación gubernamental de la mayoría de los países para hacer de las nanotecnologías un sector estratégico de I+D, basada casi exclusivamente

20 La Ley de Defensa del Consumidor, n.º 17250, establece los derechos y garantías; entre otros, el derecho del consumidor a la información sobre los productos ofrecidos en el mercado.

en la mejora de la competitividad internacional),²¹ considerar un conjunto de aspectos. Entre otros, los siguientes:

- a. Analizar los beneficios y riesgos considerando los aspectos éticos, legales y sociales conjuntamente con los medioambientales. Dichos estudios deben ser abordados desde una perspectiva transdisciplinar por los científicos de las ciencias naturales, sociales y humanas.
- b. Elaborar un marco regulatorio donde, entre otros, el principio de precaución tenga un lugar jerárquico. Es decir, exigir garantías de certeza razonable de que los productos comprados en el extranjero con componentes de NT, así como los procesos y las investigaciones de NT, no implican riesgos mayores de daños a la salud o al medio ambiente.
- c. Considerar el ciclo de vida de los productos que contengan nanotecnologías o elementos nanométricos o nanomateriales, contemplando todas sus fases hasta la eliminación total del producto luego de terminada su vida útil, con el objetivo de proteger el medio ambiente
- d. Implementar el derecho a la participación y el acceso a la libre información a toda la población, de forma que los diferentes sectores sociales puedan incidir sobre las políticas en C+T. Ello debería incluir lenguaje y terminología llanos, nomenclatura, procedimiento y normativa científica adecuados para continuar con el desarrollo de las investigaciones, y como principio básico la difusión de los resultados.
- e. Impulsar una ética de C+T por la paz. Esto no es trivial si consideramos la relevancia de la inversión de las principales potencias en I+D bélico en NT.

2.7. Conclusiones

El desarrollo de las NT en Uruguay es relativamente reciente y representa un interesante caso de articulación de estrategias de diversos actores para vincular a los investigadores del campo y crear las condiciones para llevar a cabo las actividades de (I+D).

Dada la velocidad de los desarrollos de las NT y los diferentes riesgos que estas pueden representar para la salud humana y el medio ambiente, los

21 Con frecuencia esto representa solamente ventajas en el mercado y beneficios económicos para los sectores más ricos, y puede estar muy distante de la mejora de las condiciones de vida de la mayoría de la población.

cambios de conducta o estrategias individuales o grupales no son suficientes, sino que se requieren políticas públicas sobre la materia.

El actual contexto uruguayo en el campo de políticas de ciencia, tecnología e innovación, donde las NT han sido incluidas como área prioritaria en el documento de bases y lineamientos del PENCTI y se ha implementado un conjunto de otras iniciativas para su desarrollo, aparece como un escenario óptimo para considerar los beneficios y los riesgos para la sociedad en diversos niveles (de salud, económico, cultural, laboral, ético, ambiental). Los investigadores uruguayos de NT, que hoy participan de un conjunto de relevantes proyectos nacionales e internacionales, también podrían beneficiarse de este abordaje, y constituirse en referencia regional al incorporar los aspectos éticos, sociales, legales y ambientales a sus investigaciones.

Bibliografía

AAAS (AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCE OF SCIENCE) (1985). Project 2061. <http://www.project2061.org/esp/publications/articles/psl/default.htm> (última consulta: 15/6/2012).

ALVES, Oswaldo Luiz (2007). «Nanotecnologia: o Brasil tem tudo para crescer no setor» (entrevista). *Boletim Digital do Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República do Brasil*, vol. 28, n.o 1, http://lqes.iqm.unicamp.br/images/pontos_vista_entrevista_28-1_nae.pdf (última consulta: 15/6/2012).

BÉRTOLA, Luis, Carlos BIANCHI, Pablo DARSCHT, Almícar DAVYT, Lucía PITTALUGA, Nicolás REIG, Carolina ROMÁN, Michel SNOECK y Henry WILLEBALD (2005). *Ciencia, tecnología e innovación en Uruguay. Diagnóstico, prospectiva y política*, <http://www.iadb.org/regions/re1/econ/RE1-RN-05-001.pdf> (última consulta: 15/6/2012).

CHIANCONE, Adriana (2012). «Nanociencia y nanotecnologías en Uruguay: Áreas estratégicas y temáticas grupales», en G. Foladori, N. Invernizzi y E. Záyago Lau (coords.). *Perspectivas sobre el desarrollo de las nanotecnologías en América Latina*. México: Porrúa.

CORDIS (2007). «El Grupo sobre Ética Pública: un dictamen sobre nanomedicina». *Cordis Noticias*, http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=ES_NEWS&ACTION=D&SESSION=&RCN=27032 (última consulta: 15/6/2012).

EQUIPO OPERATIVO DEL GABINETE MINISTERIAL DE LA INNOVACIÓN - GMI (2007). *Bases y principales lineamientos. Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCTI)*, <http://www.anii.org.uy/imagenes/pencti.pdf> (última consulta: 15/6/2012).

ETC GROUP (2010). «Sintia está viva... ¡y reproduciéndose! ¿Panacea o caja de Pandora?», <http://www.etcgroup.org/es/issues/patents-biopiracy> (última consulta: 15/6/2012).

FOLADORI, Guillermo (2006). «Nanotechnology in Latin America at the Crossroads». *Nanotechnology Law & Business Journal*, vol. 3, n.o 2, pp. 205-216.

GABINETE MINISTERIAL DE LA INNOVACIÓN (2007). «Lineamientos de políticas públicas en ciencia, tecnología e innovación», http://www.anii.org.uy/imagenes/innova-uy_politicas_publicas_cti_22dejun07.pdf (última consulta: 15/6/2012).

— (2009). *Bases y principales lineamientos. Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCTI)*. Montevideo: GMI.

— (2010). «PENCTI - Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación», http://www.dicyt.gub.uy/ftp/pencti_decreto.pdf (última consulta: 15/6/2012).

G-NANOTEC-UY (2006). «Investigadores uruguayos unen esfuerzos para desarrollar el promisorio campo de la nanotecnología», *Uruguay con Ciencia*, vol. 1, n.o 2, pp. 15-17.

GABINETE PRODUCTIVO (2010). *Cadenas de valor (II). Bio y nano tecnología - Avícola - Porcina - Cítricos - Textil - Vestimenta*. Montevideo: Gabinete Productivo.

PDT (PROGRAMA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO), MINISTERIO DE EDUCACIÓN Y CULTURA (s/f) «¿Que es el PDT?», <http://www.dicyt.gub.uy/pdt/pdt.html> (última consulta: 15/6/2012).

PEREYRA, Mariana (2007). *Reunión Ciencia, Tecnología y Sociedad III*. Montevideo: Facultad de Ciencias, UdelaR.

PNUMA (PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE) (2007). «Comunicado de prensa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente», <http://www.pnuma.org/cp02feb2007-anuariogeo.pdf> (última consulta: 15/6/2012).

RICYT (RED DE INDICADORES DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA) (s/f). [http://bd.ricyt.org/explorer.php/query/submit?country\[\]=UY&year=1990&year=2009](http://bd.ricyt.org/explorer.php/query/submit?country[]=UY&year=1990&year=2009) (última consulta: 15/6/2012).

UNIVERSIA (2007). *Seminario-taller: Fortalecimiento de la relación universidad-empresa*, <http://agenda.universia.edu.uy/otras/2007/06/25/seminario-taller-fortalecimiento-de-la-relacion-universidad-empresa> (última consulta: 15/6/2012).

Capítulo 3

Nanomateriales con potenciales aplicaciones tecnológicas desarrollados en el Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química

Helena Pardo²²

3.1. Introducción

En este artículo se presentará un resumen de algunas de las líneas de investigación que se vienen desarrollando en el Centro NanoMat, y que son consideradas como estratégicas tanto desde el punto de vista de su relevancia y potencialidades como porque pueden ser llevadas adelante exitosamente por el Centro con sus actuales capacidades. Sin embargo, cabe señalar que dichas capacidades están en permanente crecimiento desde su instalación, en el 2008, lo que permite el abordaje de nuevos emprendimientos.

3.2. Celdas solares fotovoltaicas nanoestructuradas (CSN)

Para el Uruguay la investigación y el desarrollo de celdas solares nanoestructuradas se presenta como una muy interesante oportunidad, fundamentalmente debido a los menores costos de fabricación que implican; esto último a diferencia de las celdas fotovoltaicas convencionales, para las cuales Uruguay no cuenta en la actualidad con una plataforma tecnológica que permita desarrollarlas.

Nuestro grupo viene trabajando con dos tipos de CSN: por un lado, las denominadas *dye-sensitized solar cells*, celdas solares sensibilizadas con

²² Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, Universidad de la República. Correo electrónico: hpardo@fq.edu.uy.

pigmentos o DSSC. La estructura de estas celdas se basa en la aplicación de pigmentos orgánicos o inorgánicos sobre una capa delgada de nanopartículas de un óxido semiconductor —en general de titanio o zinc— sinterizadas sobre un vidrio conductor que sirve como electrodo.

En estos sistemas el pigmento absorbe los fotones provenientes de la radiación solar, a partir de lo cual se produce una inyección de electrones en la banda de conducción del semiconductor; esto da lugar a la generación de los denominados *exitones* (pares del tipo hueco-electrón) y crea una separación de cargas. El circuito se cierra entre los electrodos positivo y negativo de la celda mediante la incorporación de un electrolito (en general se emplea el par redox I-/I₃⁻).

Si bien con estas celdas no se alcanzan las eficiencias que se logran con las convencionales de silicio, estas presentan las ventajas adicionales de aprovechar mejor el rango de luz solar —desde que amanece hasta que atardece— e incluso producir energías en días nublados, y además pueden ser construidas sobre sustratos flexibles, por lo que exhiben una mayor versatilidad.

El segundo tipo de CSN con las que se viene trabajando son las construidas a partir de depósitos de filmes delgados basados en cobre, indio y selenio, de allí que en forma genérica se denominan CIS, o CIGS si incluyen en su formulación también al galio.

La arquitectura de estas celdas es de tipo de heterojuntura, que básicamente consiste en una primera capa delgada conductora, en general de molibdeno, soportada sobre un vidrio transparente. Sobre dicha capa de molibdeno se deposita otra de nanopartículas de calcopirita de cobre del tipo $Cu(In,Ga,Al)(Se,S)_2$. Esta es la capa responsable de la absorción de energía solar, y sobre ella se deposita una capa delgada de sulfuro de cadmio que completa la heterojuntura.

Para la preparación de la capa de CIGS se utilizan suspensiones coloidales de nanopartículas de los óxidos precursores que forman una suerte de tinta, la cual puede ser depositada de forma relativamente sencilla sin la necesidad de trabajar a bajas presiones. Esta mezcla, al ser calentada en las condiciones adecuadas, da lugar a la formación de la capa fina de calcopirita de cobre de formulación deseada.

La ventaja principal de este tipo de CSN es que con ellas se obtienen relativamente altas eficiencias, que además se ha logrado ir aumentando con el correr de los años. Asimismo, al igual que en el caso anterior, pueden ser construidas de forma de que sean flexibles

3.3. Membranas colagénicas para reposición dérmica

Tradicionalmente en el mundo, y en Uruguay hasta la actualidad, cuando era necesario realizar un trasplante para reponer alguna sección de piel con el objetivo de evitar la pérdida de su funcionalidad anatómica o fisiológica se realizaban dos tipos de procedimientos: trasplantes autológicos, en los que la piel proviene de la misma persona, y en menor extensión trasplantes homólogos, en los que la piel proviene de un donante distinto, en general cadavérico.

Dichos procedimientos presentan problemas serios, tales como la morbilidad del sitio de extracción de los autológicos y las reacciones inmunológicas que pueden sucederse con los homólogos, o la dificultad para disponer de tejido prontamente y en cantidad suficiente en ambos casos.

Como forma de dar solución a estos problemas, desde fines de los años sesenta se ha investigado intensa y sistemáticamente tratando de desarrollar materiales sintéticos de sustitución dérmica.

Fruto de estas investigaciones es la disponibilidad actual de numerosos productos comerciales que pueden ser clasificados como pieles artificiales, los cuales están sustituyendo progresivamente a los trasplantes tradicionales debido a que han demostrado poseer mejores cualidades.

En el Centro NanoMat se viene poniendo a punto un método de preparación de matrices colagénicas para reposición dérmica preparadas a partir de colágeno tipo I reticulado mediante el agregado de sulfato de condroitín de origen bovino.

El colágeno utilizado como materia prima es extraído a partir de tendones de novillos provenientes de industrias cárnicas nacionales, para lo cual debieron optimizarse los parámetros involucrados en el proceso de extracción.

Como forma de mejorar las características de las matrices poliméricas antes descritas, éstas vienen siendo modificadas mediante el agregado de quitosán, un glucopolisacárido derivado de la quitina.

El quitosán ha demostrado poseer muy buenas características para la curación de heridas, como las de ser promotor del orden en la regeneración dermal, antibacterial, acelerador de la cicatrización, no tóxico y biocompatible. Eso lo convierte en un excelente candidato para ser utilizado en la fabricación de mallas poliméricas compuestas que funcionen como piel artificial.

Aprovechando la instancia sintética anterior también vienen siendo incorporadas a la matriz colagénica nanoesferas de quitosán, con el objeto de cargarlas, en etapas posteriores, con drogas que favorezcan el proceso de curación, tales como antibióticos o analgésicos.

3.4. Sistemas nanométricos para la liberación controlada de fármacos

Los sistemas nanométricos para la liberación controlada de fármacos son biomateriales con organización nanométrica que se emplean como reservorios para el transporte y la liberación controlada de los principios activos que contienen. Ello se hace posible gracias a que estos sistemas pueden ser sintetizados con una composición, tamaño y morfología controlados, lo que les permite vectorizar componentes activos dirigidos a células o tejidos específicos del organismo.

El tamaño nanométrico de estos sistemas los habilita a atravesar las barreras biológicas, lo cual aumenta la tolerancia, la captura y el transporte tisular y los torna eficientes para la liberación de activos hacia sitios específicos.

Asimismo, en sistemas nanoparticulados la relación área superficial/volumen se ve dramáticamente aumentada, y en la mayoría de los casos las solubilidades se ven notoriamente mejoradas. Esto último puede tener importantes implicaciones en el caso de drogas poco solubles.

Por lo tanto, la liberación controlada de fármacos mediante el uso de nanosistemas es capaz de mejorar la biodisponibilidad, entendida como la fracción de la dosis suministrada terapéuticamente activa que alcanza la circulación sistémica desde cualquier ruta de administración —debe tenerse en cuenta que durante el trayecto de una droga en el organismo existen diversas instancias que pueden impedir su llegada a destino—.

Por lo tanto, los esfuerzos dirigidos a desarrollar sistemas de transporte de drogas con incorporación de nanotecnología están actualmente en pleno crecimiento. Tanto es así que Estados Unidos, Brasil, India, la Unión Europea, etcétera, han definido a esta área como estratégica y dedican importantes recursos económicos para su desarrollo.

Se estima que el crecimiento anual de productos nanomédicos es de aproximadamente 17 %, con lo que, de mantenerse, para el año 2011 la comercialización de dichos productos alcanzará los USD 53 mil millones, de acuerdo a un estudio realizado por The Freedonia Group (2007).

Asimismo, más de la mitad de las drogas en investigación que se presentan como prometedoras por su acción específica son descartadas por su baja solubilidad, lo que resulta en problemas de biodisponibilidad. Se calcula que en el mundo se pierden por ese motivo más de USD 65 mil millones por año, por lo que la reformulación nanotecnológica de este tipo de principios activos se presenta como un área de oportunidad particularmente interesante.

Además, los principios activos que actualmente están bajo la protección de patentes a punto de vencer son otra de las interesantes oportunidades para lograr desarrollos comercializables, si se consigue reformular aquellos principios activos con fórmulas de nanotecnología patentables.

El Centro NanoMat viene dando los primeros pasos hacia la preparación de este tipo de sistemas, entre los cuales, a modo de ejemplo, se pueden citar liposomas, nanoesferas de quitosán y sistemas coloidales.

3.5. Nanografito

Se llama *grafitos nanoestructurados* o *nanografitos* a sistemas gráfiticos que presentan dimensiones nanométricas, de modo que están caracterizadas por el hecho de ser sistemas discretos donde los bordes físicos tienen un importante peso relativo, a diferencia del grafito común, que puede ser pensado como una red infinita.

La presencia de bordes abiertos de distintas clases determina en gran medida sus propiedades físicas. A modo de ejemplo, la aparición en la estructura electrónica de un estado característico llamado *estado de borde* permite una localización del espín que es una de las posibles claves para la aparición de fenómenos magnéticos no convencionales.

El desarrollo, la mejora y la difusión de técnicas microscópicas de gran alcance —particularmente la microscopía electrónica de barrido (SEM), la microscopía electrónica de transmisión (TEM), la microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM) y otras técnicas asociadas a ellas— ha permitido el estudio de una nueva clase de estructuras de carbono: las nanoestructuras gráficas.

Esta nueva categoría de estructuras gráficas incluye fragmentos formados por planos de grafenos, nanopartículas de diamante grafitizado, nanocebollas (onions), nanoconos, nanoárboles, nanocintas, nanoespumas y nanotubos, entre otras ya descubiertas y, sin duda, muchas más por descubrir.

3.5.1. Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono provienen de la familia de los fullerenos, los que fueron descubiertos en 1985 por Harry Kroto dando lugar a una nueva rama de la ciencia conocida como la nanociencia. Si bien es claro que existen reportes de este tipo de estructuras previos a 1991, fue recién en ese año que, gracias al trabajo de Sumio Iijima, la comunidad científica las reconoció como una nueva e importante forma de carbono.

Los nanotubos pueden ser pensados como enrollamientos de planos grafiticos que forman un tubo con sus extremos cerrados por moléculas de fullerenos cortadas a la mitad.

Existen dos tipos de nanotubos: los del tipo de pared múltiple (MWNT), que son los más fáciles de obtener y fueron los primeros observados por lijima, y los del tipo de pared única (SWNT), descubiertos dos años después. Los MWNT son básicamente contruidos por SWNT de varios radios, ubicados concéntricamente unos sobre otros.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, todas las evidencias indican que los nanotubos son muy flexibles, resistentes a la fractura, a la extensión y a la compresión.

Tienen una estabilidad térmica relativamente grande (comienzan a deteriorarse al aire a 750 °C y en el vacío a 2800 °C aproximadamente) y se estima que su conductividad térmica es dos veces mayor que la del diamante. Presentan una densidad relativamente baja, de entre 1,33 y 1,44 g/cm³ (la del aluminio es 2,7 g/cm³).

De manera general se puede afirmar que existen cuatro grandes formas de producir nanotubos: por descarga en arco, por ablación láser, por deposición química de vapor y por métodos hidrotermales. Cada uno de estos procedimientos cuenta con características distintas, así como con ventajas y desventajas respecto de las otras.

Debido a la infraestructura disponible en el Centro NanoMat, la síntesis de nanotubos se realiza empleando el método de deposición química de vapor.

En forma esquemática puede decirse que la deposición química de nanotubos se da a partir de una fase gaseosa sobre un sustrato especialmente preparado. Para ello se requiere una fuente de carbono al estado gaseoso, a la cual se le suministra energía mediante una resistencia o un plasma con el objetivo de descomponer catalíticamente sus moléculas, dando lugar a la formación de radicales libres de carbono extremadamente reactivos.

Estos radicales inciden sobre un sustrato caliente en el que se difunden y eventualmente forman un núcleo (seguramente tipo cluster) a partir del cual se da el crecimiento de los nanotubos.

Las fuentes de carbono más empleadas son el metano, el monóxido de carbono, el acetileno, el metanol, el etanol, el tolueno y el ferroceno.

Los sustratos más comunes son de silicio, óxido de silicio, óxido de aluminio, vidrio y zeolitas. Pueden estar depositados en capas finas o en forma de polvo policristalino ubicado sobre un contenedor apropiado.

También son muy utilizadas como sustratos membranas porosas con distintos tamaños de poro (dentro de rangos nanométricos). Entre las más

empleadas se encuentran las de óxido de aluminio y óxido de silicio. Este tipo de sustrato tiene la ventaja de favorecer el crecimiento ordenado de los nanotubos.

Los sustratos en forma de capa fina y las membranas se recubren con metales de transición tales como el hierro, el níquel y el cobalto o con sus correspondientes óxidos, que actuarán como catalizadores. También pueden usarse para recubrir el sustrato mezclas tanto de metales como de óxidos.

Los catalizadores en los sustratos en forma de polvo son agregados como nanopartículas, teniendo especial cuidado de que queden distribuidas lo más homogéneamente.

Entre los parámetros de mayor incidencia en el crecimiento de los nanotubos se encuentran la naturaleza química, el estado de oxidación y el tamaño de las partículas de catalizador.

Se ha demostrado empíricamente que ciertos metales favorecen la tendencia de crecimiento de nanotubos de pared única —por ejemplo, mezclas de Co y Mo—, mientras que otros favorecen la tendencia de formación de nanotubos de pared múltiple —por ejemplo, el hierro—.

El rango de temperaturas de trabajo es de entre 600 °C y 1000 °C aproximadamente.

El método de CVD se presenta como el más útil desde el punto de vista de las aplicaciones tecnológicas, ya que es capaz de generar cantidades relativamente grandes de producto a costos menores que los otros métodos, especialmente cuando se lo realiza mediante la modalidad de lecho fluido.

Un problema común en la producción de nanotubos es que generalmente están contaminados con subproductos (como carbón amorfo) y reactivos (como metales), por lo que un aspecto de gran importancia es su purificación posterior.

Una aplicación de mucho potencial tecnológico en la que se utilizan nanotubos de carbono es la preparación de materiales poliméricos compuestos.

Si bien la incorporación de materiales de relleno (también denominados *cargas*) es un procedimiento relativamente común en la tecnología de polímeros, la formación de polímeros compuestos nanométricos implica una interacción mucho más fuerte entre la matriz polimérica y el material de relleno nanométrico, como consecuencia de la altísima relación área/volumen que estos últimos presentan.

Los estudios realizados acerca de la incorporación de nanotubos como carga en polímeros han demostrado que esta puede provocar cambios significativos en sus propiedades originales; por ejemplo, en la dureza o la conductividad eléctrica.

3.5.2. Grafito magnético

Desde hace treinta años se publican periódicamente reportes teóricos que predicen la aparición de ferromagnetismo en materiales basados únicamente en carbono, mediante la realización de ciertas modificaciones específicas sobre las láminas de grafenos.

Es importante recordar que las propiedades específicas de cierto material no dependen exclusivamente de la naturaleza química de los átomos que lo componen, sino también de su arreglo y distribución en la microestructura — por ejemplo, la existencia de defectos en el material, su naturaleza y cómo están distribuidos—.

Asimismo, desde hace quince años aparecen también con frecuencia reportes experimentales de la constatación de ferromagnetismo en materiales únicamente de carbono.

Sin embargo, el escepticismo de la comunidad científica era prácticamente consensual y estaba basado sobre todo en dos aspectos:

- En primer lugar, se dudaba de la factibilidad de que materiales que solo presentan electrones *s* y *p* pudieran presentar ferromagnetismo (recuérdese que en los ferromagnetos tradicionales son los electrones *d* y *f* los responsables de tal comportamiento). Particularmente en el caso del carbono se pensaba que ninguna de sus formas era capaz de retener una alineación de espines y por lo tanto era prácticamente indudable que no podía presentar ferromagnetismo.
- En segundo lugar, los reportes de ferromagnetismo presentaban una muy pobre o nula reproducibilidad de sus resultados y las señales magnéticas informadas eran muy débiles, todo lo cual abría la duda acerca del origen del fenómeno reportado. En general la comunidad científica rechazaba a estas evidencias por considerarlas erróneas.

Pese a todo lo anterior, en estos últimos siete años la evidencia presentada a favor de la presencia de ferromagnetismo en nanoestructuras de carbono parece difícil de objetar.

El Centro NanoMat, en conjunto con el Grupo de Materiales y Dispositivos de la Universidad Federal de São Carlos, en Brasil, ha logrado desarrollar un proceso de nanoestructuración de grafito puro en polvo mediante un proceso de oxidación controlada en fase gaseosa. Como resultado de dicho proceso se obtiene un material grafitico puro ferromagnético.

Debido a las potenciales aplicaciones tecnológicas de dicho material, la Fundación de Apoyo Institucional para el Desarrollo Científico y Tecnológico de la Universidade Federal de São Carlos accedió a brindar apoyo financiero al

proceso de patente PCT de esta técnica y del material grafitico ferromagnético que resulta de ella.

Esta patente ya está inscrita (o en proceso de inscripción) en toda la Unión Europea, Estados Unidos, Canadá, China, México, Rusia, India, Ucrania, Sudáfrica, Corea, Japón, Noruega, Brasil y Uruguay,²³ y actualmente está licenciada por la empresa brasilera productora de grafito, la Companhia Nacional de Grafite.

3.6. Nanopartículas metálicas

Entre las diversas áreas de preparación de nanomateriales, una de las más importantes es la de síntesis de nanopartículas metálicas. El uso de dichas nanopartículas puede ser muy variado, desde catálisis y remediación de suelos hasta preparación de materiales poliméricos compuestos con propiedades bactericidas.

En particular, la preparación de nanopartículas metálicas magnéticas se presenta como especialmente interesante debido a que estas exhiben comportamientos magnéticos notoriamente distintos de los del material en bruto.

Aprovechando la gran respuesta magnética y el pequeño tamaño de este tipo de materiales se están dedicando importantes esfuerzos de investigación al desarrollo de productos nanobiotecnológicos, principalmente en imagenología y separación de biomateriales para diagnóstico y en el transporte de fármacos para el tratamiento de enfermedades.

Se han desarrollado varios métodos químicos para la síntesis de nanopartículas metálicas, entre los que se pueden mencionar la descomposición térmica en solución de compuestos metalorgánicos, la reducción en solución acuosa u orgánica, la coprecipitación controlada, la microemulsión y métodos sonoquímicos.

En forma general se puede decir que el trabajo con nanopartículas metálicas presenta dos dificultades. Una es que suelen ser muy inestables en solución acuosa debido a que son oxidadas fácilmente —por ejemplo, por el oxígeno disuelto en el agua—. La otra es que tienden a unirse entre sí para formar agregados de mayor tamaño.

Lo anterior dificulta la preparación de suspensiones estables y por lo tanto también la utilización de estas nanopartículas. Para solucionar este

23 Patente PCT: «Processo de preparação de materiais grafiticos magnéticos e materiais assim preparados», H. Pardo, A. W. Mombrú, F. M. Araújo-Moreira, 16/6/2004, PI0402338-2.

problema deben emplearse diversos tipos de agentes protectores, según las particularidades de las nanopartículas que se pretenda preparar.

En el Centro NanoMat se viene trabajando en la optimización de rutas sintéticas para la preparación de nanopartículas de plata, cobre y hierro.

Bibliografía

THE FREEDONIA GROUP (2007). *Nanotechnology in Health Care*, Study 2168, Cleveland: The Freedonia Group.

Capítulo 4

Nanotecnología: ejemplos y aplicaciones en la utilización de energía solar

Ricardo Faccio²⁴

4.1. Introducción

En este capítulo presentaremos de manera general aplicaciones que la nanotecnología puede ofrecer, tanto desde el punto de vista de procesos como también de los diversos productos basados en esta nueva tecnología que actualmente se comercializan. Posteriormente discutiremos con mayor profundidad las oportunidades que ofrece el uso de la energía solar, en particular las ventajas del uso de la nanotecnología. De esta forma mostraremos cómo esta nueva revolución tecnológica permite ir más allá de lo que se había pensado: generar nuevos productos, presentar variantes en productos ya existentes, generar nuevos procesos, hacer viables procesos que antes no lo eran, y todo esto cuidando el ambiente.

La nanotecnología (NT) consiste en la creación de materiales funcionales, dispositivos y sistemas a través de la manipulación de la materia a escala nanométrica. Un nanomaterial para ser catalogado como tal debe poseer en al menos una de sus dimensiones una longitud inferior a los 100 nanómetros (nm). Pero la nanotecnología también incluye la explotación de las propiedades y los fenómenos ocurrientes a esa escala (Los Alamos National Laboratory, *s/f*), ya que son notoriamente diferentes a los esperados para los materiales en su forma convencional.

A modo de ejemplo podemos mencionar el caso del oro. Este material cuando se encuentra en forma de volumen —por ejemplo, en un anillo— tiene

²⁴ Investigador del Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, Universidad de la República. Correo electrónico: rfaccio@fq.edu.uy.

un color amarillo-naranja acompañado del típico brillo metálico. Sin embargo, si comenzamos a tallar ese anillo para reducir sus dimensiones y en alguna de ellas nos aproximamos a los 100 nm, veremos que este material puede exhibir distintos colores que van desde el rojo hasta el azul. Este ejemplo muestra que las propiedades no solo dependen del material, sino también de sus dimensiones. El mismo átomo de oro, ahora conglomerado en diferente cantidad de átomos, exhibe propiedades ópticas bien diferentes.

La NT ha constituido toda una revolución científica y tecnológica que ha abierto la puerta a la producción de nuevos materiales y también ha ayudado a mejorar las propiedades de materiales ya conocidos que no eran precisamente nanométricos.

Desde el punto de vista histórico, quizá el primer ejemplo claro sobre nanociencia haya sido el descubrimiento de la cuarta forma alotrópica del carbono, los fullerenos. Estos son moléculas que forman superficies cerradas, huecas y compuestas exclusivamente de átomos de carbono. Quizás la forma más conocida sea la molécula con forma de balón de fútbol, llamada C60 por contener 60 átomos de carbono. Este descubrimiento, realizado en 1985, fue tan importante que llevó a sus descubridores, Robert Curl, Harold Kroto y Richard Smalley, a obtener el Premio Nobel de Química en 1996. A partir de ese momento nuevas formas interesantes de carbono —tales como nanotubos, nanocebollas, microtubos— han sido descubiertas y extensamente utilizadas en diferentes aplicaciones.

Pero no solo el arreglo supramolecular de las estructuras de carbono colma el área de la nanociencia y la nanotecnología; es posible también obtener este tipo de estructuras para compuestos mixtos e inorgánicos, con propiedades mucho más variadas. Un ejemplo interesante son los nanotubos inorgánicos de sulfuro de tungsteno: WS₂. Este material no solo fue el primer ejemplo de nanotubos o nanopartículas inorgánicos, sino también uno de los primeros ejemplos de *spin-off* en nanotecnología. El investigador Reshef Tenne, luego de su descubrimiento, estableció una planta de escalado y comercialización bajo la firma ApNano Materials (<http://www.apnano.com/>). La estructura laminar de este material lo posiciona muy bien para su uso como «lubricante seco»; por otra parte, se muestra como material duradero debido a su alta resistencia y flexibilidad.

Quizá los materiales nanotecnológicos más conocidos por su amplia utilización sean los mencionados a continuación, que además de involucrar materiales involucran nuevas tecnologías:

- Magneto resistencia colosal: explica el funcionamiento de los discos duros de computadoras y es responsable de la imparable tasa de

crecimiento en la capacidad de almacenamiento de memorias portátiles.

- Recubrimientos nanométricos: permiten superficies autolimpiantes y filtros ópticos más efectivos.
- Catalizadores: aceleran y viabilizan la producción de determinados procesos químicos.
- Materiales compuestos: consisten en la mezcla de dos o más materiales con el objetivo de que sus propiedades sean mejores que las de cada uno.
- Liberación controlada de fármacos: control en el direccionamiento del fármaco seleccionado para lograr mayor eficacia con menores dosis, además de efectos de liberación prolongada.

A continuación nos centraremos en la producción de energía eléctrica a partir de energía solar utilizando materiales producidos en base nanotecnológica.

4.2. Energía solar

El agotamiento progresivo de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles genera importantes consecuencias en las economías de los países del mundo. Estos combustibles, plataforma de sustento del desarrollo económico a lo largo del siglo XX y lo que va del siglo XXI, han creado una dependencia total de nuestro sistema de vida respecto a la adquisición de fuentes de energía que puedan, al menos en la misma medida, mantener la operativa de transporte, producción, calefacción, iluminación, etcétera.

El aumento del costo del barril de petróleo en los últimos cuatro años, desde los 20 dólares a los actuales más de 60, habiendo pasado por 140 dólares, es una muestra inequívoca de que la búsqueda de energías alternativas ya dejó de ser una preocupación futurista, para instalarse en la agenda de los gobiernos, el sector privado y la academia.

Los aspectos relativos a la conservación del medio ambiente indican como de altísima prioridad aquellas fuentes de energía que sean renovables y no contaminantes. El uso de la energía solar viene consolidándose desde las últimas cuatro décadas como una alternativa válida para cuando los derivados del petróleo sean escasos y costosos. Sin embargo, varios contratiempos han surgido a este respecto: el elevadísimo costo de dicha tecnología, amortizable a muy largo plazo, junto con los vaivenes económicos y políticos globales, caracterizados por la aparición de nuevos depósitos de combustibles o por la mayor disposición temporal del petróleo, han conspirado para que el

uso masivo de celdas solares no fuese visto como una opción atractiva. No obstante, la producción de celdas fotovoltaicas ha evolucionado hasta lograr un precio actual del orden de 5-10 USD/W, más accesible pero aún alto para hacerlas competitivas. Basta señalar como ejemplo la futura instalación en Salto de una planta que proveerá 300 kW con una inversión de 5 millones de dólares.

En este escenario de los últimos años, coincidente con el aumento considerable del costo del petróleo, han surgido nuevas tecnologías para el desarrollo de celdas solares fotovoltaicas, las que en mayor o menor medida podrían ser alternativas convenientes en orden a la producción masiva de dispositivos con promesa de accesibilidad y eficiencia para utilizar la energía solar. Dentro de esta serie de nuevas alternativas tecnológicas para la aplicación en celdas solares se encuentran aquellas que están basadas en el desarrollo de nanomateriales, es decir, basadas en nanotecnología. Esta tecnología, de aplicación transversal a la enorme mayoría de los desarrollos tecnológicos de importancia, puede aportar la solución para el uso de la energía solar.

Entre las tecnologías para la conversión de energía solar podemos identificar cuatro grandes grupos:

1. concentrados fotovoltaicos de células multiunión;
2. células de silicio cristalino: silicio monocristalino y policristalino;
3. tecnologías de capa fina: capas finas que utilizan semiconductores CIGS ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$) y CdTe;
4. tecnologías emergentes: celdas solares sensibilizadas con pigmentos y celdas orgánicas.

Todas ellas se diferencian no solo en las estructuras de los materiales utilizados, sino en la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica η , con valores de 41 %, 27,6 %, 20 % y 7 %, para las tecnologías 1, 2, 3 y 4 respectivamente. La gran pregunta que puede surgir es: ¿tiene sentido utilizar celdas solares con eficiencias tan bajas? La respuesta no se encuentra solo en el valor de la eficiencia, sino en el costo por superficie que posee la celda. Las celdas solares de mayor eficiencia presentan el costo por metro cuadrado más elevado, ya que durante su producción se deben alcanzar altas temperaturas y trabajar en cámaras blancas para evitar la contaminación con polvo u otros contaminantes, utilizando técnicas extremadamente sofisticadas. Además, las tecnologías emergentes, como las celdas sensibilizadas (tipo 4 de la lista anterior), presentan una eficiencia muy baja, pero con un costo de producción y un nivel de complejidad de las tecnologías claramente inferior. Esto abre toda una gama de opciones en torno a este tipo de celdas, con el

propósito de compensar su baja eficiencia con la posibilidad de maximizar las superficies de los dispositivos para obtener una potencia eléctrica más razonable.

Gran parte de la viabilidad económica de las celdas solares sensibilizadas se debe a la incorporación de la nanotecnología en su fabricación. Por lo tanto, detallaremos un poco más la tecnología que involucran estas celdas de tipo (4).

4.2.1. Celdas solares sensibilizadas con tintas

Las celdas solares sensibilizadas con tintas (en inglés: *dye-sensitized solar cells* [DSSC]), mediante el uso de pigmentos fijados a nanomateriales, proveen de sostén a un sistema válido de reconversión de energía solar en energía eléctrica a través de mecanismos químicos.

La clorofila del reino vegetal es un ejemplo natural excelente de lo que se debería lograr para aprovechar la energía solar de la mejor manera. Las transformaciones químicas que tienen lugar en los vegetales hacen un aprovechamiento muy elevado de la energía solar. Si bien el uso de la clorofila en sí mismo no es aplicable en el momento actual, debido a su rápida degradación cuando se la ilumina en un medio no acuoso, marca de todas formas un camino de investigación muy prometedor.

Esta ha sido la idea motriz del desarrollo de una nueva serie de celdas solares fotoelectroquímicas tipo Grätzel (O'Regan y Grätzel, 1991; Saurer, Grätzel y Meyer, 1996) basadas en pigmentos fijados en nanomateriales, que se encuentran ya en eficiencias del 7 %. Si bien este valor puede parecer bajo, hay que considerar el poco tiempo de desarrollo de esta línea y el menor costo, que haría que no fuera gran problema aumentar las superficies de exposición solar (Faccio, 2011).

Como elemento adicional muy importante está el hecho de que es una tecnología abordable en un país como el Uruguay. Esta tecnología está aún en desarrollo en el mundo, con los primeros atisbos de productos comerciales disponibles, lo que hace que una investigación en esta área en Uruguay sea aún competitiva y con puertas abiertas para aplicar innovación propia. Incluso a través de productos naturales autóctonos se pueden realizar innovaciones originales mediante la sustitución de los pigmentos utilizados, con el propósito de captar mayor energía solar al seleccionar diferentes porciones del espectro de ondas electromagnéticas.

4.2.2. Tecnologías de capa fina

Otra tecnología basada en nanoescala es aquella mediante la cual se aplican capas sucesivas de diferentes materiales cuyo punto más importante, la capa que absorbe la energía solar, logra la mejor tasa de eficiencia/bajo costo mediante la aplicación de una tinta en la cual el material semiconductor, CIGS, se encuentra en suspensión de nanopartículas, a partir de la que se logra una aplicación de alta homogeneidad bajo la forma de película delgada (CIGS: $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$) (Kapur y otros, 2003; Kaelin y otros, 2004; Sager y otros, 2007; Panthani y otros, 2008; Basol, 2009a y 2009b; Menezes, 2009).

El abaratamiento de costos en estos dispositivos se logra gracias a la sencilla aplicación de la capa de CIGS usando las tintas y a la baja cantidad de materiales empleados en una aplicación tipo película delgada. Con ello se consigue, por ejemplo, compensar la limitada disponibilidad de indio que se ha encontrado en la naturaleza, garantizando la sustentabilidad de esta tecnología.

Se estima que esta tecnología será altamente competitiva respecto de las tecnologías convencionales en base silicio, y que en el futuro compartirá el mercado internacional de energía solar fotovoltaica. Ello se debe a su bajo costo, que actualmente podría estar en condiciones de superar la barrera del dólar por vatio, y a las eficiencias alcanzadas, que, según el sustrato empleado, permiten valores de entre 8 y 16 %. Además, el procedimiento de aplicación bajo forma de tinta habilita la cobertura de superficies muy amplias, lo que, combinado con la posibilidad de la flexibilidad del sustrato y de la propia celda, hace a este tipo de dispositivos muy aptos para ser instalados con concentradores de radiación solar.

El estudio combinado de estos dos tipos de celdas solares, cuyo denominador común es el empleo de nanomateriales, es un excelente banco de pruebas para comparar diseño, materiales —procesos y propiedades—, eficiencia y costos, a fin de avanzar hacia la producción nacional de partes de celdas solares fotovoltaicas o incluso, en la mejor de las perspectivas, celdas solares completas, en forma masiva.

4.3. Producción y fabricación de prototipos en el Uruguay

Todos los motivos mencionados hacen por demás interesante el trabajo y el desarrollo en el área de la nanotecnología como el fin de producir, y mejor, nuevos productos y procesos. Por tal motivo, el Centro NanoMat, del Polo Tecnológico de Pando de la Facultad de Química, lleva adelante trabajos de

investigación e innovación con el objetivo de generar capacidades y know-how en torno a esta tecnología tan importante para el desarrollo del conocimiento en general, y en particular para el desarrollo tecnológico local.

Las tareas actualmente se enfocan en la preparación de nanopartículas y nanotubos de óxido de titanio, sobre lo cual posteriormente se aplican las tintas y pigmentos capaces de absorber la radiación solar en el rango del espectro visible. Esto ha permitido ensamblar, a costo muy bajo, los primeros prototipos en el ámbito local de celda solar sensibilizada.

Pero el trabajo no solo se centra en preparar estos materiales o en la fabricación de dispositivos, sino en realizar un seguimiento adecuado en distintas etapas que son, a nuestro entender, fundamentales. Esto implica preparar materiales, luego caracterizarlos desde el punto de vista químico y físico, para finalmente evaluar su rendimiento desde el punto de vista tecnológico. Todas estas etapas se integran en el grupo de investigación, con lo que se conforma un grupo interdisciplinario capaz de entender y diseñar nuevos dispositivos con mejores desempeños.

Todo esto se ve ayudado por una clara tendencia en el ámbito internacional al uso de la nanotecnología, que felizmente no es tan vieja como para que el Uruguay no pueda incorporarse en esa tendencia.

Estar al tanto de los últimos avances, generar capacidades humanas y tecnológicas, ser conscientes y definir áreas estratégicas de desarrollo inteligentes, todas constituyen decisiones claras y eficientes para la consolidación tecnológica de un país que busca, en el desarrollo económico, una sociedad con calidad de vida y oportunidades para todos sus habitantes.

Bibliografía

BASOL, B. M. (2009a). Low temperature nano particle preparation and deposition for phase-controlled compound film formation. US Patent, 7537955, B2.

— (2009b). Technique and apparatus for depositing thin layers of semiconductors for Solar cell application. US Patent, 7374963, B2.

FACCIO, R., L. FERNÁNDEZ-WERNER, H. PARDO y A. W. MOMBRÚ (2011). «Current trends in materials for dye sensitized solar cells», *Recent Patents on Nanotechnology*, vol. 5, n.o 1, pp. 46-61.

KAELIN, M., D. RUDMANN y A. N. TIWARI (2004). «Low cost processing of CIGS thin film solar cells», *Solar Energy*, n.o 77, pp. 749-756.

KAPUR, V. K., A. BANSAL, P. LE y O. I. ASENSIO (2003). «Non-vacuum processing of $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ solar cells on rigid and flexible substrates using nanoparticle precursor inks», *Thin Solid Films*, n.o s 431-432, pp. 53-57.

LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY (s/f). «What is Nanotechnology?», <http://www.lanl.gov/mst/nano/definition.html> (última consulta: 3/5/2010).

MENEZES, S. (2009). Thin film solar cell configuration and fabrication method. US Patent 7560641 B2.

O'REGAN, B., y M. GRÄTZEL (1991). «A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films», *Nature*, n.o 353, pp. 737-739.

PANTHANI, M. G., V. AKHAVAN, B. GOODFELLOW, J. P. SCHMIDTKE, L. DUNN, A. DODABALAPUR, P. F. BARBARA y B. A. KORGEL (2008). «Synthesis of CuInS_2 , CuInSe_2 , and $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ (CIGS) Nanocrystal "Inks" for Printable Photovoltaics», *Journal of the American Chemical Society*, n.o 130, pp. 16770-16777.

SAGER, B. M., D. YU y M. R. ROBINSON (2007). Coated nanoparticles and quantum dots for photovoltaic cells. US Patent, 7306823, B2.

SAURER, E., M. GRÄTZEL y T. MEYER (1996). Photovoltaic cell. US Patent, 5482570.

Capítulo 5

Materiales biocompatibles: un nuevo desafío de investigación²⁵

Mariana Pereyra²⁶

5.1. Introducción

El desarrollo de la nanotecnología y la nanociencia ha tenido un crecimiento importante en esta última década. Es un área del conocimiento transversal a todas, ya que hace referencia a la escala de trabajo. Por tal motivo es aplicable a física, química, biología, electrónica, etcétera, lo cual permite generar grupos de investigación multidisciplinarios.

El presente capítulo pretende introducir el conocimiento sobre la síntesis de nanoestructuras de óxido de titanio, en particular nanotubos y su aplicación en biomateriales, desarrollado en el contexto de la integración de dos laboratorios uruguayos: el Laboratorio de Biomateriales de Facultad de Ciencias y el Laboratorio de Física del Estado Sólido de Facultad de Ingeniería,²⁷ de la Universidad de la República.

25 El presente trabajo está basado en mi tesis doctoral: *Efecto de la nanoestructuración de superficies de titanio para el desarrollo de superficies biocompatibles*. Este trabajo cuenta con las siguientes fuentes de financiación: PEDECIBA Química, Beca de Postgrado ANII y Fondo Clemente Estable 2008 ANII.

26 Asistente Unidad de Bioquímica Analítica, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, UdelaR. Correo electrónico: mpereyra05@gmail.com.

27 El Laboratorio de Biomateriales está integrado por los doctores Eduardo Méndez, Fernanda Cerdá, el licenciado Santiago Botasini y la bachiller Laura Luzuriaga.

Los objetivos del Laboratorio se enmarcan en el área de caracterización de nuevos materiales que puedan ser aplicados al desarrollo de biosensores y al estudio de interacciones moleculares.

En particular, se han desarrollado técnicas de cuantificación de la unión entre metales y proteínas en solución. Se han desarrollado sensores específicos para la detección de especies en solución, basados en la modificación de superficies de metales nobles con tioles y polímeros, capaces de actuar como anzuelos para captar proteínas como mioglobina y citocromo c. Se han obtenido superficies modificadas con tioles sobre nanopartículas de oro, capaces de servir como soportes para captar proteínas con actividad redox, como el citocromo c, y amplificar así la señal redox de estas.

5.2. Características del titanio

El titanio es uno de los materiales de mayor aplicación en implantes dentales y óseos, debido a sus excelentes propiedades, que incluyen buena resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica y biocompatibilidad* (Kar y otros, 2006; Suba y otros, 2007).²⁸ Estas características se observan, principalmente, por la formación espontánea de una capa de óxido sobre el metal dada por la acción del oxígeno atmosférico. Para que se produzca una adecuada biocompatibilidad, que permita la adhesión ósea, es necesario cubrir el titanio con una capa de hidroxiapatita*, la cual posee una composición química similar a la del hueso.

En los últimos años, gracias al advenimiento de técnicas nanoscópicas, ha sido posible establecer que los eventos de reconocimiento celular están fundamentalmente dictados por las nanorrugosidades de las superficies, sean estas biomoléculas, biomembranas o tejidos, mientras que la composición química parecería ser un factor complementario. Por tal motivo, es de esperar que se obtengan materiales de mayor biocompatibilidad si su superficie se encuentra nanoestructurada.

La síntesis de nanotubos ha despertado un gran interés en el ámbito científico-tecnológico debido a que su alta relación superficie/volumen confiere nuevas propiedades a estos materiales. En particular los nanotubos de dióxido de titanio han demostrado tener varias aplicaciones, principalmente en transformación de la energía solar y biomateriales. Asimismo, su naturaleza semiconductora y la geometría de crecimiento vertical desde el sustrato lo hacen ideal para la fotoelectrólisis del agua en el uso de celdas solares y también como sensor de gas hidrógeno (Mor y otros, 2006).

5.3. ¿Por qué son importantes las características del material?

Idealmente, la nanoestructuración de una superficie de titanio con el fin de ser empleada en implantes debería mimetizar la estructura del tejido. Este desafío es uno de los objetivos principales de la bionanociencia, un área de investigación que ha tenido fuerte desarrollo desde la incorporación de las técnicas nanoscópicas. La introducción de la microscopía de tunelado electrónico (STM) y de fuerza atómica (AFM) ha permitido reconocer que los materiales biológicos poseen una arquitectura jerárquica bien organizada que se adapta al cumplimiento de determinadas funciones (Chun y otros, 2006).

28 Términos con símbolo *, véase el glosario al final del texto.

Estas estructuras se extienden en varios órdenes de magnitud, cumpliendo con las definiciones de la geometría fractal*, que permiten su caracterización mediante un único parámetro: la dimensión fractal* (Mandelbrot, 2003).

El desarrollo de estructuras biomiméticas* a nivel nanoscópico requiere, por lo tanto, el conocimiento estructural del tejido a ser sustituido al mismo nivel.

5.3.1. Estructura y composición del tejido óseo

Nuestro cuerpo se soporta sobre el sistema esquelético, que ha evolucionado hacia un diseño óptimo para cumplir con los requerimientos mecánicos, a la vez que alcanzar un compromiso entre tamaño y peso. El hueso es un tejido conectivo especializado, rico en matriz extracelular formada por proteínas y minerales. En el adulto, los huesos están organizados con un 80 % de masa cortical y un 20 % de masa trabecular. El tejido cortical es denso (80 a 90 % de calcificación) y poco poroso (30 % con tamaños de poro de 1 mm de diámetro) y se encuentra en la diáfisis* de los huesos largos. Por su parte, el tejido trabecular es menos denso (5 a 20 % de calcificación) y muy poroso (90 % de poros), se encuentra en la metáfisis* y epífisis* de los huesos y forma una red tridimensional interconectada por bastones que se organizan en redes ramificadas.

Los huesos están compuestos por un 70 % de material inorgánico, un 20 % de materia orgánica y un 10 % de agua. La fase inorgánica consiste en sales de fosfato de calcio y carbonato de calcio bajo la forma de cristales similares a la hidroxiapatita, de 20 a 80 nm de largo y 4 a 6 nm de ancho. Estos cristales se encuentran formando estructuras ordenadas entre fibras de colágeno de ~ 300 nm de longitud. La topología generada por esta estructura jerárquica se supone que constituye la base de los fenómenos de adhesión de las células óseas, así como de varias macromoléculas que incluyen factores de crecimiento, proteínas inductoras de la formación de huesos, lípidos y proteínas adhesivas.

5.3.2. Materiales biocompatibles

Para que un material implantado en un organismo funcione correctamente, debe presentar algunas características específicas: a) no toxicidad, b) resistencia a la corrosión en fluidos biológicos, c) fuerza suficiente para resistir los movimientos, d) resistencia a la fatiga, e) habilidad para promover la adhesión celular y f) biocompatibilidad con el tejido huésped u órgano. Una baja biocompatibilidad del material implantado provocará

daños tanto a los tejidos como al propio material. Los productos de corrosión producidos por las interacciones químicas entre el material implantado y el ambiente del organismo puede provocar efectos negativos en el tejido (Cheng y Roscoe, 2005) o en el propio implante (Suba y otros, 2007).

El titanio y sus aleaciones son empleados en diversos implantes ortopédicos. Para que estos materiales resulten bioactivos* y para mejorar su osteointegración*, las características fisicoquímicas de las superficies a implantar son fundamentales. En particular, la adhesión de las células óseas sobre las superficies modificadas y su durabilidad dependen de las características del material. Los métodos empleados habitualmente para cumplir con los requerimientos principales de un implante incluyen la formación de una capa de dióxido de titanio, TiO_2 , sobre la superficie, o el recubrimiento con hidroxiapatita [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$] (Park y otros, 2006; Müller y otros, 2007).

Si bien la información encontrada en la literatura sobre estos dos tipos de modificaciones es amplia, las ventajas que tiene la formación de modificaciones nanoestructuradas ha sido tema activo de investigación en los últimos dos años. Las ventajas de la nanoestructuración de las superficies involucradas en el desarrollo de los implantes pueden verse en diferentes niveles.

1. Superficie de titanio. La nanoestructuración de la superficie de titanio bajo la forma de nanotubos favorece la adhesión de los depósitos de hidroxiapatita, aumentando significativamente la unión entre ambos (Kar y otros, 2006; Lin y otros, 2006).
2. Superficie de hidroxiapatita. Cuando el depósito de hidroxiapatita se encuentra nanoestructurado se produce una mayor osteointegración in vivo (Wang y otros, 2006) y adhesión de colágeno* (Manara y otros, 2007). Con base en estos resultados se han desarrollado varios métodos para producir depósitos nanoestructurados de hidroxiapatita (Zhang y otros, 2006; Ye y Wang, 2007; Kim y otros, 2007).
3. Adhesión y crecimiento celular. La nanoestructuración de la superficie de titanio no solo aumenta la cantidad de hidroxiapatita que se puede formar, sino que también produce un aumento en la densidad de osteoblastos adheridos a ella (Huang y otros, 2005; Harle y otros, 2006; Im y otros, 2007; Dalby y otros, 2007).

5.3.3. Proyecto de investigación

El trabajo de investigación propuesto tiene como objetivo general estudiar el efecto de la nanoestructuración de una superficie de titanio en medios biológicos.

5.4. Modificación de la superficie de titanio

5.4.1. Oxidación del titanio: síntesis de nanotubos

El titanio es considerado un metal resistente a la corrosión y esto se debe a que sobre la superficie se forma espontáneamente una fina capa de óxido nativo (2 a 6 nm), producto de la exposición al ambiente, que actúa como una capa pasivante. Las estructuras cristalinas del TiO_2 que existen naturalmente se llaman *rutilo*, *anatasa* y *bruquita*. El rutilo es la fase termodinámicamente estable del TiO_2 cristalino y se puede formar sobre titanio por tratamiento térmico. El mecanismo generalmente aceptado para la formación de apatitas sobre el dióxido de titanio en medios biológicos reconoce como etapa inicial la adsorción de este sobre el óxido. Luego, por una serie de reacciones químicas, el calcio y fosfatos provenientes del fluido biológico se unen a la superficie formando una capa de fosfato de calcio. Esta capa cristaliza bajo la forma de apatita.

La superficie de titanio también puede ser oxidada por diferentes métodos. En particular, en este trabajo se empleó un método llamado *anodización electroquímica*. Consiste en colocar dos electrodos (placas de titanio, Ti) en una solución con reactivos que permiten la conducción de la corriente eléctrica, llamados *electrolitos*. Luego se le hace pasar una corriente constante para generar los nanotubos sobre la superficie de la chapa.

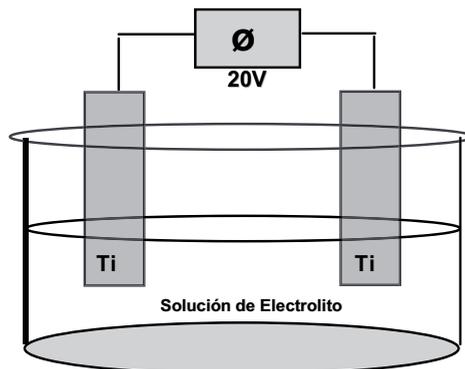


Figura 1. Celda de dos electrodos para la síntesis de TiO_2 nanoestructurado

Los nanotubos se forman a partir de hendiduras que se generan en la superficie de la chapa al circular la corriente, las cuales se hacen más profundas hacia el interior del material definiéndose los nanotubos al cabo de tres horas.

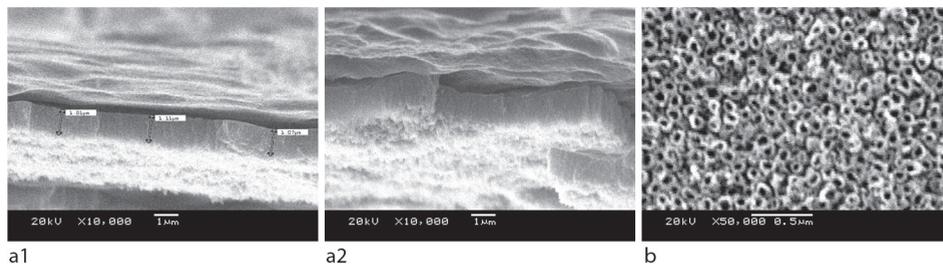


Figura 2. Nanotubos de dióxido de titanio.

a.1 y a.2: vistas de perfil. b: vista de arriba

Imagen tomada con microscopio de barrido, SEM, Facultad de Ciencias, Udelar.

5.4.2. Síntesis de hidroxiapatita (HA)

Los métodos para recubrir las superficies de titanio con hidroxiapatita incluyen plasma spray, sol-gel, electroforesis, sputtering con radiofrecuencia y deposición electroquímica (Zhu y otros, 2003). Si bien el proceso de plasma spray es el más utilizado comercialmente, los recubrimientos obtenidos suelen presentar microhendiduras, baja adhesión a la superficie metálica, cambios de fase con la temperatura y densidad de cubrimiento variable. Por su parte, la electrodeposición* de hidroxiapatita se lleva a cabo a temperaturas más bajas, previniendo la formación de cambios de fase, y es posible controlar el espesor del recubrimiento. Resulta un procedimiento sensiblemente más económico.

Las investigaciones realizadas con el método electroquímico de deposición de hidroxiapatita han revelado que la fuerza de unión con el sustrato (placa de titanio) es baja (Redepenning y otros, 1996; Ban y Maruno, 1998; Shirkhanzadeh, 1998; Kuo y Yen, 2002; Robler y otros, 2002).

Una de las posibles causas de esta baja adherencia puede encontrarse en una inadecuada topografía del sustrato, por lo que surge como hipótesis de trabajo que una superficie del sustrato que mimetice la presentada por el tejido trabecular en los huesos resultaría adecuada para mejorar la adherencia. En otras palabras, es necesario proceder a la nanoestructuración del sustrato para conseguir los fines deseados. Por tal motivo es que se utilizan los nanotubos de TiO₂ como potenciales sustratos para la síntesis de apatitas.

En algunos trabajos se han comparado diferentes métodos de síntesis de HA, en los cuales se sintetiza en medios que simulan los fluidos biológicos como si fuera dentro del organismo. En todos estos trabajos se observó que

la síntesis de HA por electrodeposición es la que presenta una mejor adhesión celular y crecimiento del hueso a los largo del implante (Yang y otros, 2009).

5.4.3. Pruebas de biocompatibilidad

Finalmente, las superficies modificadas serán evaluadas desde el punto de vista de la biocompatibilidad, estudiando la adhesión de colágeno y osteoblastos. Para los estudios de colágeno se contará con la asistencia del Dr. Juan Claudio Benech, del Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable, y para el estudio de adhesión de osteoblastos, con la colaboración de la Dra. Mónica Fernández, del Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (La Plata, Argentina).

5.5. Reflexiones finales

En Uruguay son pocos los grupos que trabajan en nanotecnología de materiales, y solo un par de ellos han trabajado en la síntesis de nanotubos.

El uso del método electroquímico de anodización, en las condiciones propuestas en el proyecto presentado, para la síntesis de nanotubos de dióxido de titanio no se ha realizado antes en el país. Por lo tanto, el aporte al estado del arte en la materia puede ser fundamental para el desarrollo de nuevos materiales que sirvan como base para aplicaciones tecnológicas más complejas. En un futuro se podrían generar en nuestro país implantes con mayor biocompatibilidad e inclusive adaptados a las necesidades del paciente.

Glosario

bioactivos. Materiales que tiene una interacción o efectos sobre cualquier tejido celular en el cuerpo.

biomaterial. Material ideado para interactuar con los sistemas biológicos para evaluar, tratar, aumentar o sustituir cualquier tejido, órgano o función del cuerpo.

biomimético. ('que imita la naturaleza'). Aplicación de los métodos y sistemas naturales a la ingeniería y la tecnología.

colágeno. Principal constituyente del tejido conjuntivo y de la sustancia orgánica de los huesos y cartílagos.

diáfisis. Parte media de los huesos largos.

dimensión fractal. Valores no enteros que describen figuras irregulares. En términos de dimensión topológica, una recta tiene dimensión 1, el área dimensión 2 y el volumen dimensión 3. La dimensión fractal proporciona valores fraccionarios a figuras que presentan irregularidad topológica.

electrodeposición. Proceso mediante el cual se deposita por medio de electrólisis una sustancia sobre un electrodo.

epífisis. Extremos de los huesos largos

geometría fractal. Término inventado en 1975 por el matemático francés B. Mandelbrot para describir la geometría de aquellas figuras irregulares que se presentan en la naturaleza y que no siguen una geometría euclidiana típica.

hidroxiapatita. Principal componente inorgánico de los huesos de vertebrados, dentina y esmalte dental. Cristal principalmente formado por fósforo y calcio.

metáfisis. Zona del hueso entre la diáfisis y la epífisis. Corresponde a la zona de eliminación del cartílago y del depósito óseo.

osteointegración. Integración del material al hueso.

Bibliografía

BAN, S., y S. MARUNO (1998). «Hydrothermal-electrochemical deposition of hydroxyapatite», *Journal of Biomedical Materials Research*, n.o 42, p. 387.

CHENG, X., y S. G. ROSCOE (2005). «Corrosion behavior of titanium in the presence of calcium phosphate and serum proteins», *Biomaterials*, n.o 26, p. 7350.

CHUN, A. L., J. G. MORALES, T. J. WEBSTER y H. FENNIRI (2006). *Self-assembled organic nanotubes: novel bionanomaterials for orthopedics and tissue engineering*. Londres: Taylor & Francis.

DALBY, M. J., N. GADEGAARD, R. TARE, A. ANDAR, M. O. RIEHLE, P. HERZYK, C. D. W. WILKINSON y R. O. C. OREFFO (2007). «The control of human mesenchymal cell differentiation using nanoscale symmetry and disorder», *Nature Materials*, vol. 6, n.o 12, pp. 997-1003.

HARLE, J., H. W. KIM, N. MORDAN, J. C. KNOWLES y V. SALIH (2006). «Initial responses of human osteoblasts to sol-gel modified titanium with hydroxyapatite and titania composition», *Acta Biomaterialia*, n.o 2, p. 547.

HUANG, H. H., S. J. PAN, F. H. LU (2005). «Surface electrochemical impedance in situ monitoring of cell-cultured titanium with a nano-network surface layer», *Scripta Materialia*, n.o 53, p. 1037.

IM, K. H.; S. B. LEE, K. M. KIM e Y. K. LEE (2007). «Improvement of bonding strength to titanium surface by sol-gel derived hybrid coating of hydroxyapatite and titania by sol.gel process», *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, pp. 1135-1138.

KAR A., K. S. RAJA y M. MISRA (2006). «Electrodeposition of hydroxyapatite onto nanotubular TiO₂ for implant applications», *Surface and Coatings Technology*, vol. 201, pp. 3723 ss.

KIM, M. S., J. J. RYU e Y. M. SUNG (2007). «One-step approach for nano-crystalline hydroxyapatite coating on titanium via micro-arc oxidation», *Electrochemistry Communications*, n.o 9, p. 1886.

KUO, M. C., y S. K. YEN (2002). «The process of electrochemical deposited hydroxyapatite coatings on biomedical titanium at room temperature», *Materials Science and Engineering*, C 20, p. 153.

LIN, J. H., C. H. CHANG, Y. S. CHEN y G. T. LIN (2006). «Formation of bone-like apatite on titanium filament by a simulated body fluid inducing process», *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, p. 3665.

MANARA, S., F. PAOLUCCI, B. PALAZZO, M. MARCACCIO, E. FORESTI, G. TOSI, S. SABBATINI, P. SABATINO, G. ALTANKOV y N. ROVERI (2007). «Electrochemically-assisted deposition of biomimetic hydroxyapatite-collagen coatings on titanium plate», *Inorganica Chimica Acta*, doi:10.1016/j.ica.2007.03.044.

MANDELBROT, B. (2003). *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona: Tusquets.

MOR, G. K., O. K. VARGHESE, M. PAULOSE, K. SHANKAR y C. A. GRIMES (2006). «A review on highly ordered, vertically oriented TiO₂ nanotube arrays: Fabrication, material properties, and solar energy applications». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, n.o 90, p. 2011.

MÜLLER, L., E. CONFORTO, D. CAILLARD y F. A. MÜLLER (2007). «Biomimetic apatite coatings - Carbonate substitution and preferred growth orientation», *Biomolecular Engineering*, doi:10.1016/j.bioeng.2007.07.011.

PARK, J. H., D. Y. LEE, K. T. OH e Y. K. LEE (2006). «Bioactivity of calcium phosphate coatings prepared by electrodeposition in a modified simulated body fluid», *Materials Letters*, n.o 60, p. 2573.

REDEPENNING, J., T. SCHLESSINGER, S. BURNHAM, L. LIPPIELLO y J. MIYANO (1996). «Characterization of electrolytically prepared brushite and hydroxyapatite coating on orthopedic alloys», *Journal of Biomedical Materials Research*, vol. 30, p. 287.

ROBLER, R., A. SEWING, M. SLOLZER, R. BORN, D. SCHANWEBER, M. DARD y H. WORCH (2002). «Electrochemically assisted deposition of thin calcium phosphate coatings at near-physiological pH and temperature», *Journal of Biomedical Materials Research*, A 64, p. 655.

SHIRKHAZADEH, M. (1998). «Direct formation of nanophase hydroxyapatite cathodically polarized electrodes», *The Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, n.o 9, p. 67.

SUBA C., M.LAKATOS-VARSÁNYI, A. MIKÓ, L. KOVÁCS, N. VELICH, B. KÁDÁR y G. SZABÓ (2007). «Study of the electrochemical behavior of Ti osteosynthesis plates used in maxillofacial surgery», *Materials Science and Engineering*, A 447, p. 347.

WANG, H., N. ELIAZ, Z. XIANG, H. P. HSU, M. SPECTOR, L. W. HOBBS (2006). «Early bone apposition in vivo on plasma-sprayed and electrochemically deposited hydroxyapatite coatings on titanium alloy», *Biomaterials*, vol. 27, p. 4192.

YANG G., F. HE, J. HU, X. WANG y S. ZHAO (2009). «Effects of biomimetically and electrochemically deposited nano-hydroxyapatite coatings on osseointegration of porous titanium implants», *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, vol. 107, p. 782.

YE, W., y X. X. WANG (2007). «Ribbon-like and rod-like hydroxyapatite crystals deposited on titanium surface with electrochemical method», *Materials Letters*, vol. 61, p. 4062.

ZHANG, Y. Y., J. TAO, Y. C. PANG y W. WANG (2006). «Electrochemical deposition of hydroxyapatite coatings on titanium», *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 16, p. 633.

ZHU, X., D. W. SON, J. L. ONG y K. KIM (2003). «Characterization of hydrothermally treated anodic oxides containing Ca and P on titanium», *Journal of Materials Science*, vol. 14, p. 629.

Capítulo 6

Nanociencia, nanotecnología y nanobiología

Natalia Oddone, Marcos Tassano, Juan Pablo Damián, Natalia Pi, Ana Inés Zambrana, Dolores Etchegoimberry, Pablo Cabral, Juan Claudio Benech²⁹

6.1. Introducción

Para entender bien los conceptos de nanociencia, nanobiología y nanotecnología, así como para definirlos, es conveniente establecer primero cuáles son las principales diferencias entre ciencia y tecnología. De una manera general, podemos decir que la ciencia es el trabajo que se realiza en un laboratorio de investigación y que busca respuestas para determinadas preguntas aplicando el método científico. Los resultados obtenidos de estas investigaciones se redactan en trabajos científicos que se publican en revistas especializadas internacionales. Estos trabajos son previamente analizados por otros científicos especialistas en el tema en cuestión. La tecnología parte de los conocimientos básicos establecidos por la ciencia para construir un dispositivo o aparato que tenga determinada utilidad. El conocimiento necesario para generar el nuevo dispositivo o aparato generalmente se traduce en una patente (mecanismo utilizado para proteger la invención y los derechos de los inventores). La creación de tecnología proporciona a los científicos nuevas herramientas para contestar nuevas preguntas y avanzar en la ciencia, que a su vez generará nueva tecnología. Por lo tanto, podríamos decir que ciencia y tecnología son las dos caras de una misma moneda.

El prefijo nano- significa la mil millonésima parte de algo. En el caso de un nanómetro, significa la mil millonésima parte de un metro, es decir, 10^{-9} m. Demos un ejemplo para tener una idea de estas dimensiones. Imaginemos

²⁹ Director del Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología. Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE). Correo electrónico: benech@iibce.edu.uy.

un niño de 1 metro de altura. Si buscamos algún ser vivo mil veces más pequeño, podríamos nombrar algunos insectos que miden milímetros (10^{-3} m). Los insectos están formados por células. Cada célula es mil veces menor (10^{-6} m). Si seguimos disminuyendo en tamaño, llegaríamos al nivel molecular y atómico, que es justamente el tema que nos convoca (10^{-9} m). Dado que muchas de las propiedades físicas y químicas de la materia se modifican en tamaños comprendidos entre 0,1 y 100 nanómetros, este sería el mundo nano estrictamente hablando.

En 1959, varios años antes de recibir el Premio Nobel de Física, el Dr. Richard Feynman pronunció en el Instituto de Tecnología de California una conferencia titulada «Hay mucho espacio al fondo» («*There is plenty of room at the bottom*»). En esa conferencia el Dr. Feynman sentó los pilares de lo que luego sería conocido como nanotecnología. Expuso allí sus ideas de cómo manipular, controlar y fabricar objetos de muy pequeñas dimensiones. Decía Feynman en su discurso:

Los principios de la física, tal como yo los veo, no niegan la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo. Al no violar ninguna ley, no hay motivo para que no pueda hacerse. En el mundo de lo muy, muy pequeño, muchas cosas nuevas podrán suceder, porque los átomos se comportan de manera distinta a como lo hacen los objetos a mayor escala, pues deben satisfacer las leyes de la mecánica cuántica.

Y más adelante:

A nivel atómico, aparecen nuevos tipos de fuerza, nuevas posibilidades, nuevos efectos.

Esta es una de las ideas básicas de la nanotecnología, que consiste en un cambio en la estrategia a la hora de fabricar estructuras: el paso de una tradición de arriba abajo, *top-down*, a un futuro de abajo arriba, *bottom-up*, manipulando la materia a nivel atómico.

Podemos dar ahora una definición del concepto de nanotecnología. Es el estudio, la síntesis y la manipulación de materiales y sistemas funcionales mediante el control de la materia a escala nanométrica. Tiene por objetivo la fabricación de materiales, objetos y dispositivos tecnológicos en esa escala. Por otra parte, la nanociencia estudia la materia a escala de estructuras moleculares y atómicas, utilizando las herramientas de la física, la química, la biología y la ciencia de los materiales, a fin de responder preguntas básicas sobre el comportamiento de estructuras en esa escala. La nanobiología podría ser definida como el estudio de material biológico en escala nanométrica.

Cuando el material biológico puede ser manipulado en esta escala con el fin de obtener algún producto tecnológico, tenemos el concepto de nanobiotecnología.

A continuación daremos cuatro ejemplos sobre el trabajo de investigación que estamos desarrollando en nuestro laboratorio, en el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable. Los tres primeros son de investigación definida como básica, sin una aplicación inmediata concreta a corto plazo. El cuarto ejemplo es un poco diferente, pues, si bien la investigación es básica, busca tener aplicaciones a corto plazo.

6.2. Trabajos de Investigación desarrollados en el IIBCE

Nuestro laboratorio se dedica al estudio de las señales celulares. La transducción de señal es el conjunto de procesos o etapas que ocurren de forma concatenada por el que una célula convierte determinada señal o estímulo exterior en otra señal o respuesta específica. El proceso de transmisión de señal afecta a una secuencia de reacciones bioquímicas dentro de la célula que se lleva a cabo a través de proteínas y/o enzimas unidas a otras sustancias llamadas *segundo mensajeros*. Los cambios en la concentración citosólica de Ca^{2+} han mostrado ser un sistema de señalización muy versátil, que regula varios procesos celulares diferentes, como el movimiento, la secreción, la proliferación y varios otros. Los cambios en la concentración intracelular de Ca^{2+} son detectados por las células como una señal con un significado que debe ser decodificado. Esta decodificación de la información contenida en las señales de Ca^{2+} es mediada por proteínas capaces de unir Ca^{2+} (sensores de Ca^{2+}) que transmiten esta información al blanco final. Como forma de garantizar la función de señalización del Ca^{2+} , las células cuentan con varios sistemas de transporte de Ca^{2+} que regulan su homeostasis en forma muy precisa (Sotelo y Benech, 1997). Uno de estos sistemas de transporte son las llamadas *bombas de Ca^{2+}* ($\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{-ATPasa}$). Estas bombas de Ca^{2+} son proteínas y por lo tanto nanoestructuras biológicas.

6.2.1. La $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}\text{-ATPasa}$

Trabajando con este transportador hemos tenido aportes relevantes. Hemos encontrado evidencias de que en ciertas condiciones experimentales la bomba de Ca^{2+} puede comportarse como un canal de Ca^{2+} (Benech y otros, 1991, 1995; García-Teijeiro y otros, 1999). Caracterizamos el ciclo de reacciones de la Ca^{2+} ATPasa del sistema tubular denso de plaquetas

humanas y mostramos que la estequiometría de esta SERCA (Sarco Endoplasmic Reticulum Calcium ATPase) es diferente de la SERCA de retículo sarcoplásmico de músculo esquelético de conejo (Benech y otros, 1995). También mostramos la capacidad de ciertas drogas de desacoplar la enzima y promover un aumento en el eflujo de Ca^{2+} pero sin síntesis de ATP (García-Teijeiro y otros, 1999). A través de nuestro trabajo de investigación con esta proteína pudimos dar respuesta a algunas preguntas fundamentales sobre el mecanismo de funcionamiento de esta nanoestructura que se encuentra en prácticamente todas las células animales.

6.2.2. Modulación de la síntesis proteica local

En colaboración con el Dr. J. R. Sotelo hemos trabajado en aspectos metabólicos del sistema nervioso, especialmente en la síntesis proteica en el territorio axonal, sináptico y su regulación. En los organismos eucariotas, la síntesis de proteínas extramitocondriales ocurre en nanoestructuras biológicas denominadas *ribosomas*. Este es un tema de investigación muy interesante e importante, ya que en los últimos años han aumentado las evidencias de la existencia de ribosomas y polisomas activos en el dominio axonal y presináptico. De acuerdo con el dogma establecido, en las células nerviosas todas las proteínas son sintetizadas en el soma de la neurona y luego transportadas por transporte axonal al axón y al terminal nervioso (véase Ochs, 1982). Sin embargo, varios grupos de investigación (Dr. E. Koenig, Universidad de Buffalo, EUA; Dr. A. Giuditta, Universidad de Nápoles, Italia; Dr. Jaime Álvarez, Universidad Católica de Chile), incluido el nuestro, han presentado evidencias muy convincentes que soportan la existencia de un sistema local de síntesis de proteínas en axones y terminales nerviosas. En este sentido hemos contribuido con varias publicaciones utilizando diversas técnicas, como autorradiografía a nivel de microscopía óptica, inmunocitoquímica a nivel óptico y electrónico, inmunoprecipitación, Northern blot, RT-PCR, inmunoblot, etcétera (Sotelo y Benech, 1997; Kun y otros, 1998; Sotelo y otros, 1999; Sotelo-Silveira y otros, 2000; Calliari y otros, 2002) (véanse Koenig y Giuditta, 1999; Álvarez y otros, 2000).

Con respecto al terminal nervioso, al inicio de la década de los 90 se reportó que la fracción sinaptosomal obtenida del lóbulo óptico del calamar era capaz de sintetizar proteínas extramitocondriales (Crispino y otros, 1993). Esta fracción fue caracterizada en forma bioquímica y por medio del uso de la autorradiografía a nivel de microscopía electrónica, como el componente presináptico de las neuronas fotorreceptoras del lóbulo óptico del calamar, que contiene polisomas activos (Crispino y otros, 1997 a y b).

La caracterización de la existencia de síntesis local de proteínas a nivel axonal y del terminal nervioso nos llevó a estudiar posibles mecanismos de regulación, y uno de los candidatos obvios era el Ca^{2+} . En este sentido, en colaboración con el Dr. A. Giuditta, comenzamos a estudiar la modulación del sistema local de síntesis de proteínas en los sinaptosomas preparados del lóbulo óptico del calamar. Observamos que el proceso de síntesis proteica estaba muy cerca de su máximo a la concentración basal de Ca^{2+} citosólico y era marcadamente inhibido cuando la concentración de este ion era disminuida o aumentada (Benech y otros, 1994, 1996, 1997, 1999). La posibilidad de que el Ca^{2+} modulara la síntesis local de proteínas sinaptosomal fue confirmada midiendo la concentración de Ca^{2+} en un único sinaptosoma previamente cargado con FURA2 AM. Estos experimentos fueron realizados en colaboración con el Dr. E. Brown del Laboratorio de Neurobiología de la Estación Zoológica de Nápoles, Italia. En su estado de reposo, la concentración de Ca^{2+} fue de 80 nM ($n = 10$, sem 5,7). La adición de cafeína, de thapsigargin y de KCl aumentaron la concentración de Ca^{2+} a 300 nM. Por otra parte, BAPTA AM disminuyó el Ca^{2+} citosólico a menos de 100 nM (Benech y otros, 2000).

El conjunto de estos resultados sugiere que el rango de sensibilidad de modulación de la síntesis proteica local está en una ventana de Ca^{2+} entre 80 y 300 nm. Sugiere asimismo que la nanomaquinaria de síntesis proteica eucariota (ribosomas) está presente a nivel presináptico. Los resultados también sugieren que variaciones en la concentración del Ca^{2+} citosólico en el terminal presináptico, producto de la actividad neuronal, puede contribuir a la modulación de la síntesis local de proteínas con importancia para procesos plásticos neuronales como la memoria o el aprendizaje. Por último, los resultados también sugieren la existencia de poblaciones de ARNm específicas del terminal nervioso, aspecto que llevó a interesarnos en el proceso de síntesis de ARN del núcleo celular y su regulación.

6.2.3. Señales de Ca^{2+} en el núcleo celular.

En los últimos años, el papel del Ca^{2+} como segundo mensajero se ha expandido a una gran variedad de eventos, desde mecanismos celulares de transducción ya clásicos, como el acoplamiento excitación-contracción en las células musculares, a fenómenos cognitivos tan complejos como el aprendizaje y la memoria. En este contexto el núcleo celular se ha convertido en uno de los focos principales de investigación, en particular cómo las señales de Ca^{2+} que se generan en el citosol pueden afectar fenómenos nucleares. Asimismo, de un tiempo a esta parte se ha comenzado a concebir al núcleo como un organelo capaz de generar y mantener su propia homeostasis de Ca^{2+} con

relativa independencia de las variaciones en el Ca^{2+} citosólico (Hardingham y otros, 1997; Itano y otros, 2003; Echeverría y otros, 2003).

En esta línea de investigación, estamos estudiando la señalización a nivel nuclear por Ca^{2+} y el proceso de transcripción. Estamos utilizando como paradigma experimental núcleos aislados de hígado de rata y células en cultivo (cultivo primario de células miometriales humanas y de neuronas). Hemos encontrado la existencia de por lo menos dos componentes de Ca^{2+} que afectan la síntesis de ARN: a) concentración de Ca^{2+} en el nucleoplasma en sí misma; b) calcio acumulado en el envoltorio nuclear en forma dependiente de la bomba de calcio SERCA presente en dicho envoltorio (Benech y otros, 2005; Escande, Arbildi y otros, 2007 a y b). Hemos encontrado también que la liberación de Ca^{2+} desde el envoltorio nuclear en respuesta a IP_3 es capaz de promover la fosforilación del factor de transcripción CREB y que un aumento del Ca^{2+} nuclear a 500 nM promovió la activación de la transcripción del ARNm de $\text{PGC1-}\alpha$. (Escande, 2007; Escande, Arbildi y otros, 2007c; Escande y otros, 2009, en redacción final). Esta proteína es un co-activador de la transcripción y en conjunto con CREB estimula la expresión de los mensajeros de PEPCK1 y G-6-Pasa , contribuyendo de esta forma a la regulación de la gluconeogenesis en hígado.

Por otra parte, hemos encontrado algunos procesos que no son dependientes de Ca^{2+} y que podrían otorgar nuevas funciones a la enzima CD38 localizada también a nivel de la membrana nuclear interna. Esta proteína ha sido implicada como la enzima responsable de la síntesis y degradación de ADP ribosa cíclica (cADPR). cADPR ha sido propuesto como un agonista natural de los receptores RyR. Sin embargo, tenemos evidencias experimentales que sostienen un efecto directo de cADPR en la activación de CREB (Escande, 2007). Recientemente, en colaboración con el Dr. E. Chini, de la Mayo Clinic and Foundation, utilizando también núcleos aislados de hígado, hemos encontrado que la enzima CD38 podría controlar los niveles intranucleares de NAD y que ratones KO para esta enzima tienen aumentada la actividad de la desacetilasa Sirt 1 (Aksoy y otros, 2006).

En conjunto, estos resultados sugieren que el núcleo celular es capaz de generar y mantener su propia homeostasis de Ca^{2+} . Variaciones de la homeostasis de Ca^{2+} nuclear originadas en el propio núcleo celular podrían estar modulando procesos tan importantes como la gluconeogénesis en el hígado.

6.2.4. Obtención y caracterización de un conjugado dendrímero PAMAM G4 FITC: estudio de su ingreso y distribución en cultivo primario de células miometriales humanas (CMH)

Los dendrímeros poliamidoamina (PAMAM) son una clase de polímeros que constituyen potenciales vectores en terapia génica y vehículos de drogas. Presentan una estructura altamente ramificada, cuya superficie multivalente permite la unión covalente de diversas moléculas hidrofílicas. Los dendrímeros PAMAM de las generaciones 4-6 constan, además, de un interior o núcleo que permite el empaquetamiento de moléculas hidrofóbicas. Estas nanoestructuras miden respectivamente 4 y 6,7 nanómetros. En estudios de internalización y tráfico intracelular de dendrímeros PAMAM en distintos tipos celulares se ha encontrado que aquellos son captados por endocitosis.

Nosotros estudiamos la entrada y la distribución de los dendrímeros PAMAM G4-FITC en un cultivo primario de células miometriales humanas (CMH). Este cultivo lo desarrollamos en conjunto con el Dr. E. Chini en el marco del proyecto titulado «Homeostasis de Ca²⁺ en el miometrio humano. Señalización por ADP-ribosa cíclica y participación del Ca²⁺ nuclear». Para ello obtuvimos un conjugado dendrímero PAMAM G4-FITC que caracterizamos y mostró ser estable. Encontramos que los dendrímeros PAMAM G4-FITC ingresaron en las células a partir de las cinco horas y se distribuyeron en la región perinuclear, sin marca a nivel del núcleo celular. La viabilidad de las células miometriales no fue significativamente afectada por el conjugado. Sin embargo, cuando los dendrímeros fueron incubados en núcleos aislados de hígado de rata o en células previamente electroporadas, se observó que ingresaban en el núcleo celular. En esta última condición experimental, el patrón de distribución intracelular de los dendrímeros fue marcadamente diferente.

En conjunto, estos resultados sugieren que en las células miometriales humanas los dendrímeros PAMAM G4 FITC muy posiblemente ingresen por endocitosis, tal como ha sido descrito para otros tipos celulares. La modificación de la vía de ingreso puede alterar significativamente la localización intracelular de los dendrímeros. Esta estrategia puede resultar interesante para dirigir dendrímeros a compartimientos celulares específicos, especialmente con los dendrímeros G4 y G6, sugeridos como muy buenos candidatos para transportar drogas.

6.3. Microscopía de fuerza atómica: nanociencia, nanotecnología y nanobiología

Interesados en la señalización a nivel del núcleo celular, comenzamos a estudiar los poros nucleares en muestras fijadas e in vivo utilizando microscopía de fuerza atómica (AFM), en colaboración con la Dra. T. Creczynski-Pasa, del Departamento de Farmacología de la Universidad Federal de Santa Catarina (Brasil), y el Dr. A. Pasa, del Instituto de Física de la misma universidad. En colaboración con los mencionados investigadores, creamos la Primera Red Sudamericana de Nanobiotecnología en Sistemas Biomiméticos. En el 2006, a raíz de un artículo publicado en el semanario Búsqueda y con el incentivo de la SUPCyT, fundamos con otros investigadores uruguayos interesados en la nanociencia y nanotecnología un grupo interdisciplinario que denominamos G-Nanotec-Uy.

Por último, queremos resaltar que el IIBCE ha adquirido e instalado este año el primer microscopio de fuerza atómica del país. Este microscopio, en su configuración actual, es el único instalado por el momento en el mundo. Vemos esta adquisición como un hecho realmente relevante, que hace posible a los investigadores del Uruguay contar con una herramienta fundamental hoy en día para el desarrollo de la nanociencia, la nanotecnología y la nanobiología.

Bibliografía

AKSOY, P., C. ESCANDE, T. A. WHITE, M. THOMPSON, S. SOARES, J. C. BENECH y E. N. CHINI (2006). «Regulation of SIRT 1 mediated NAD dependent deacetylation: a novel role for the multifunctional enzyme CD38», *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 13 de octubre, vol. 349, n.o 1, pp. 353-359.

ÁLVAREZ, J., A. GIUDITTA y E. KOENIG (2000). «Protein synthesis in axons and terminals: significance for maintenance, plasticity and regulation of phenotype. With a critique of slow transport theory», *Progress in Neurobiology*, n.o 62, pp. 1-62.

BENECH, J. C., A. GALINA y L. DE MEIS (1991). «Correlation between Ca²⁺ uptake, Ca²⁺ efflux and phosphoenzyme level in sarcoplasmic reticulum vesicles», *Biochemical Journal*, n.o 274, pp. 427-432.

BENECH, J. C., H. WOLOSKER y L. de MEIS (1995). «Reversal of the calcium pump of blood platelets», *Biochemical Journal*, n.o 306, pp. 35-38.

BENECH, J. C., M. CRISPIDO, J. T. CHUN, B. B. KAPLAN y A. GIUDITTA (1994). «Protein synthesis in nerve endings from squid brain: modulation by calcium ions», *The Biological Bulletin*, vol. 187, p. 269.

BENECH, J. C., M. CRISPIDO, R. MARTIN, J. ÁLVAREZ, B. B. KAPLAN y A. GIUDITTA (1996). «Protein synthesis in the presynaptic endings of the squid photoreceptor neuron: in vitro and in vivo modulation», *The Biological Bulletin*, vol. 191, p. 263.

BENECH, J. C., M. CRISPIDO, B. B. KAPLAN y A. GIUDITTA (1997). «Protein synthesis in presynaptic endings of squid brain: regulation by Ca²⁺ ions», en J. R. SOTELO y J. C. BENECH, *Calcium and Cellular Metabolism: Transport and Regulation*. Nueva York y Londres: Plenum Press, pp 155-162.

— (1999). «Protein synthesis in presynaptic endings from squid brain: modulation by calcium ions», *Journal of Neuroscience Research*, vol. 55, pp. 776-781.

BENECH, J. C., p. LIMA, J. R. SOTELO y E. BROWN (2000). «Ca²⁺ dynamics in synaptosomes isolated from the squid optic lobe», *Journal of Neuroscience Research*, vol. 62, pp. 840-846.

BENECH, J. C., C. ESCANDE y J. R. SOTELO (2002). «Effect of the SERCA Ca²⁺-ATPase inhibitor thapsigargin and Ca²⁺ ionophores on RNA synthesis and over ATP dependent Ca²⁺ uptake in isolated rat liver nuclei». XIV International Biophysics Congress, Argentina, 2002.

— (2003). «Correlation between RNA synthesis and the Ca²⁺ filled state of the nuclear envelope store». International Workshop Calcium release and cellular calcium signalling domains, Marbella (Chile), 28 de setiembre al 2 de octubre del 2003.

— (2005). «Correlation between RNA synthesis and the Ca²⁺ filled state of the nuclear envelope store», *Cell Calcium*, vol. 38, n.o 2, pp. 101-109.

BROWN, E. R., J. C. BENECH, J. R. SOTELO y S. PISCOPO (2001). «Metabotropic glutamate receptors are present in squid optic lobe», *British Neuroscience Association's Abstracts*, vol. 16, p. 06.14.

CALLIARI, A., J. SOTELO-SILVEIRA, M. C. COSTA, J. NOGUEIRA, L. C. CAMERON, A. KUN, J. C. BENECH y J. R. SOTELO (2002). «Myosin V is locally synthesized following nerve injury», *Cell Motility and Cytoskeleton*, vol. 51, pp. 169-76.

CRISPINO, M., E. CASTIGLI, C. PERRONE CAPANO, R. MARTIN, E. MENICHINI, B. B. KAPLAN y A. GIUDITTA (1993). «Protein synthesis in a synaptosomal fraction from squid brain», *Molecular and Cellular Neuroscience*, vol. 4, pp. 366-374.

CRISPIDO, M., B. B. KAPLAN, R. MARTIN, J. ÁLVAREZ, J. T. CHUN, J. C. BENECH y A. GIUDITTA (1997). «Active polysomes are present in the large presynaptic endings of the synaptosomal fraction from squid brain», *The Journal of Neuroscience*, vol. 17, pp. 7694-7702.

ECHIVARRIA, W., M. LEITE, M. GUERRA, W. ZIPFEL y M. NATHANSON (2003). «Regulation of calcium signals in the nucleus by a nucleoplasmic reticulum», *Nature Cell Biology*, vol. 5, pp. 440-446.

ESCANDE, C. (2007). *Regulación de la expresión génica por señales de calcio en el hígado. Efecto de la variación de Ca²⁺ nuclear en la fosforilación del factor de transcripción CREB y en la expresión del ARN mensajero de PGC1-alfa*. Tesis de maestría (PEDECIBA), Uruguay, abril de 2007.

ESCANDE, C., P. ARBILDI, E. CHINI y J. C. BENECH (2007a). «The Nuclear envelope Store and the Regulation of Transcription», en A. R. DEMESI. *Cellular Signaling and Apoptosis Research*. Nueva York: Nova Science, pp. 201-219.

— (2007b). «The Nuclear envelope Store and the Regulation of Transcription», en N. O. GRACHEVSKY. *Signal Transduction Research Trends*. Nueva York: Nova Science, pp. 187-205.

— (2007c). *A rise in nucleoplasmic Ca²⁺ can modulate CREB phosphorylation and the expression of the mRNA of the transcriptional co-activator PGC1- α in isolated liver nuclei*. P.022, ICBP, 2007. Montevideo, Uruguay.

ESCANDE, C., P. ARBILDI, J. R. SOTELO y J. C. BENECH (2004). 3.er Encuentro de Jóvenes Biólogos. Facultad de Ciencias, UdelaR, Montevideo, 14-16 de octubre.

— (2009). «Calcium regulates CREB phosphorylation and the synthesis of PGC1-alpha in liver nuclei». Manuscript.

GARCÍA TEJJEIRO, R., J. R. SOTELO y J. C. BENECH (1999). «Calcium efflux from platelet vesicles of the dense tubular system. Analysis of the possible contribution of the Ca²⁺ pump». *Molecular and Cellular Biochemistry*, vol. 199, pp. 7-14.

GÓMEZ-FERNÁNDEZ, C., F. J. MARTÍN-ROMERO, J. C. BENECH y C. GUTIÉRREZ-MERINO (2007). «Early cathepsin D activation and a ROS burst cause the rapid cerebellar granule neurons death induced by doxorubicin». Manuscript.

HARDINGHAM, G., F. ARNOLD y H. BADING (2001). «Nuclear calcium signaling controls CREB-mediated gene expression triggered by synaptic activity». *Nature Neuroscience*, vol. 4, n.o 3, pp. 261-267.

ITANO, N., S. OKAMOTO, D. ZHANG, S. A. LIPTON y E. RUOSLAHTI (2003). «Cell spreading controls endoplasmic and nuclear calcium: A physical gene regulation pathway from the cell surface to the nucleus», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 100, n.o 9, pp. 5181-5186.

KOENIG, E., y A. GIUDITTA (1999). «Protein synthesis machinery in the axon compartment». *Neuroscience*, vol. 89, pp. 5-15.

SOTELO, J. R., y J. C. BENECH (1997). «Calcium and cellular metabolism», en J. R. SOTELO y J. C. BENECH. *Calcium and Cellular Metabolism: Transport and Regulation*. Nueva York y Londres: Plenum Press, pp. 125-142.

SOTELO, J. R., A. KUN, J. C. BENECH, A. GIUDITTA, J. MORILLAS y C. R. BENECH (1999). «Ribosomes and Polyribosomes are present in the squid giant axon: an immunocytochemical study», *Neuroscience*, vol. 90, pp. 705-715.

SOTELO-SILVEIRA, J. R., A. CALLIARI, A. KUN, J. C. VENCE, C. SANGUINETTI, C. CHALAR y J. R. SOTELO (2000). «Neurofilament mRNAs are present and translated in the normal and severed sciatic nerve», *Journal of Neuroscience Research*, vol. 62, pp. 65-74.

Capítulo 7

La tercera ola en secuenciación de genomas: instrumentos nanotecnológicos y aplicaciones biotecnológicas

Fabián M. Capdevielle³⁰

7.1. Introducción

Los recientes desarrollos conceptuales e instrumentales en el ámbito de los proyectos de secuenciación de genomas completos se están extendiendo a numerosas especies de plantas, animales y microorganismos. Los avances en técnicas automatizadas de secuenciación y el incremento en el poder de computación disponible para organizar e interpretar sus resultados experimentales han revolucionado las capacidades para generar y analizar enormes cantidades de información vinculadas con la organización y el funcionamiento de diversos sistemas biológicos de alta relevancia productiva, social y ambiental. Esto ha generado un creciente interés científico en la elucidación de los aspectos fundamentales de la biología de estos organismos, y al mismo tiempo ha impulsado la aplicación biotecnológica de estos conocimientos para ampliar la variabilidad genética explorada por los programas de mejoramiento genético que desarrollan nuevas variedades vegetales cultivadas, nuevos inóculos microbianos y nuevas poblaciones de animales seleccionados.

30 Facultad de Ingeniería, Universidad ORT. Correo electrónico: fabian.capdevielle@gmail.com.

7.2. Surfeando las dos primeras olas

La primera ola en secuenciación de genomas a gran escala extendió globalmente el uso de técnicas automatizadas basadas en el método Sanger —previamente empleado por numerosos investigadores y estudiantes de posgrado en su versión operada manualmente—, incorporando aspectos organizacionales innovadores para integrar consorcios internacionales enfocados en la caracterización estructural y funcional de genotipos utilizados como referencia para cada especie estudiada. En los años 90 y principios de los 2000 los proyectos genoma abrieron nuevos horizontes en el conocimiento biológico, impulsaron el desarrollo del área bioinformática y facilitaron la implementación de diversos enfoques biotecnológicos aplicados en el desarrollo de productos y servicios intensivos en conocimiento. Algunos de los instrumentos de esta primera ola de secuenciación se instalaron en Uruguay —en sus versiones más básicas— en el marco de programas de fortalecimiento de capacidades científico-tecnológicas, y actualmente se encuentran operativos como parte de proyectos de investigación y desarrollo (I+D) y servicios de evaluación de variantes genéticas gestionados por instituciones públicas y empresas biotecnológicas.

A partir del año 2005 se consolidó el desarrollo de una segunda ola en las tecnologías de secuenciación que está revolucionando el campo de las ciencias naturales, basada en un sistema totalmente novedoso que permite determinar la secuencia de millones de fragmentos de ADN en forma simultánea y su integración informática a través de algoritmos que permiten ensamblar el genoma en estudio. Este cambio de la tecnología y sus instrumentos también ha impulsado una drástica reducción en los costos asociados con la generación de nueva información genómica. Como comparación, durante la primera ola se integraron durante un período de trece años los recursos de un consorcio internacional para obtener una secuencia representativa del genoma humano —a partir de muestras combinadas de ADN procedentes de diversas personas— a un costo cercano a 2700 millones de dólares, mientras que durante esta segunda ola la secuencia del genoma de una persona pudo ser obtenida por un único laboratorio en pocos meses y a un costo menor de 1 millón de dólares.

Actualmente las nuevas versiones de estos equipos permitirían obtener la secuencia de un genoma individual en menos de un mes, lo que ha impulsado iniciativas tales como 1000 Genomas Humanos, un consorcio internacional enfocado en integrar información sobre la variabilidad humana a nivel genético y fenotípica, con potenciales aplicaciones que se extienden desde modelado genético a nivel poblacional hasta farmacogenómica y diseño

de tratamientos para medicina personalizada. Existen actualmente numerosos servicios de secuenciación basados en esta segunda ola tecnológica, en los que resulta posible gestionar desde la resecuenciación de muestras individuales hasta la secuenciación *de novo* de genomas completos. Siguiendo tendencias globalizadoras en materia de costos, algunos de los servicios más económicos de secuenciación a escala industrial se ubican en países emergentes que han realizado una alta inversión en infraestructura científico-tecnológica, frecuentemente en acuerdo con las empresas multinacionales que han diseñado y comercializado los secuenciadores de la segunda ola.

Como un ejemplo de esta nueva ecuación costo/beneficio aplicada al campo de la investigación agrobiotecnológica, a través de un acuerdo con un centro de referencia en España se utilizó una fracción de la capacidad diaria de un solo instrumento para secuenciar por menos de 7000 dólares más de 95 millones de pares de bases, a partir de una muestra del ADN de un biotipo de arroz con características de maleza (arroz rojo) que está siendo estudiado en Uruguay. Este caso ilustra respecto al potencial existente en diversos proyectos científico-tecnológicos para incorporar enfoques genómicos y bioinformáticos que soporten el desarrollo de diversas aplicaciones biotecnológicas, y en los que el objetivo no es repetir una secuenciación completa *de novo* —la que puede eventualmente estar justificada por el interés científico del caso— sino facilitar la comparación, la integración y el aprovechamiento del conocimiento previamente generado en el ámbito de diversos proyectos genoma, con interés directo en la resolución de problemas tecnológicos relevantes desde el punto de vista productivo, social y ambiental.

7.3. La tercera ola: integrando nanotecnología y biotecnología

A partir de la incorporación de enfoques nanotecnológicos en el diseño de los instrumentos utilizados para analizar secuencias de ADN, se ha consolidado una tendencia a la reducción del tiempo y el costo requeridos para disponer de información genómica, por lo que el impacto científico-tecnológico de esta tercera ola en secuenciación podrá ser incluso mayor en los próximos años, al extenderse el número de los proyectos genoma existentes así como la profundidad de los análisis realizados dentro de cada especie. En forma comparativa, un genoma humano individual se obtuvo en el 2009 por menos de 50 000 dólares utilizando un solo instrumento desarrollado en el marco de esta tercera ola. Esto ha llevado a Stephen Quake —profesor de biotecnología de la Universidad de Stanford— y sus colegas del grupo responsable de

implementar el prototipo de uno de estos instrumentos nanotecnológicos a expresar que este avance permitiría «una democratización de los frutos de la revolución del genoma y asegurar que todo el mundo puede jugar a este juego», mientras otros colegas suyos enfatizaban los contrastes respecto a olas anteriores al indicar que «una tarea que solía costar tanto como un Boeing 747 y requería un equipo de personas que podían llenar la mitad del avión ahora cuesta tanto como un automóvil y el personal podría viajar en ese vehículo».

Una característica destacada para esta tercera ola en secuenciación es la capacidad para analizar moléculas de ADN en forma individual (SMRT: *single molecule real time sequencing*), logrando integrar la escala nanométrica de la doble hélice del ADN en diversos nanodispositivos que permiten controlar la dinámica de los procesos de síntesis o degradación utilizados para identificar los nucleótidos («letras» A, T, C o G) que componen la secuencia de un fragmento determinado de ADN. Esto resulta particularmente relevante en cuanto a la ampliación de la base genética que sería analizable mediante este tipo de tecnologías innovadoras, que apuntan a generar rápidamente extensas colecciones de información genómica (genomas de diversos individuos versus una única representación del genoma de una especie) con costos operativos de menos de 1000 dólares por genoma, apuntando a la futura extensión de estas tecnologías al mercado de diversos servicios profesionales (asesoramiento terapéutico, análisis clínicos, emprendimientos bioindustriales y de monitoreo ambiental, etcétera).

En algunos casos —por ejemplo, Pacific BioSciences— que ya han entrado en la fase comercial como equipos de secuenciación de la tercera ola, se logra la detección del cambio en la fluorescencia asociado con la incorporación de cada nucleótido durante la síntesis enzimática de una copia de la molécula original (utilizada como molde), que permanece inmovilizada en una nanocelda (ZMW: *zero mode waveguide*). Un ZMW es en definitiva un orificio (decenas de nm de diámetro) establecido en una estructura metal-SiO₂ que actúa como una cámara nanofotónica de visualización (volumen: 20 zeptolitros), donde los cambios en la fluorescencia para una molécula individual de ADN pueden detectarse en tiempo real. Esta arquitectura es altamente paralelizable dado que el proceso de detección ocurre en múltiples nanoceldas simultáneamente (cada una con una molécula diferente de ADN), lo que permitiría alcanzar velocidades de secuenciación miles de veces más rápidas respecto a tecnologías precedentes.

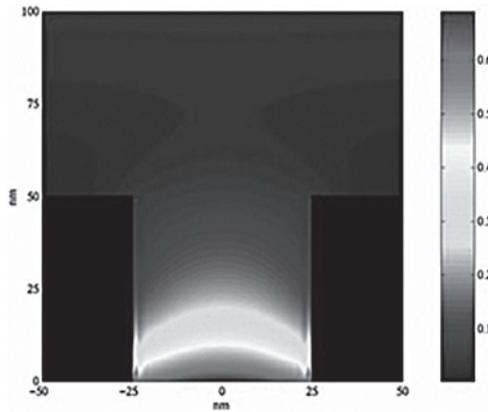


Figura 1. Detección de fluorescencia asociada con proceso de secuenciación de una molécula individual de ADN en una cámara nanométrica (volumen: 20 zeptolitros)

Fuente: www.pacificbiosciences.com.

Otra de las tecnologías de la tercera ola —Oxford Nanopore— se basa en la utilización de nanoporos (1 nm de diámetro) formados por una proteína (alfa-hemolisina), los que pueden ser adaptados como sensores de diferentes moléculas a través de la incorporación (utilizando técnicas de ingeniería de proteínas) de sitios de unión específicos al ADN dentro del nanoporo.

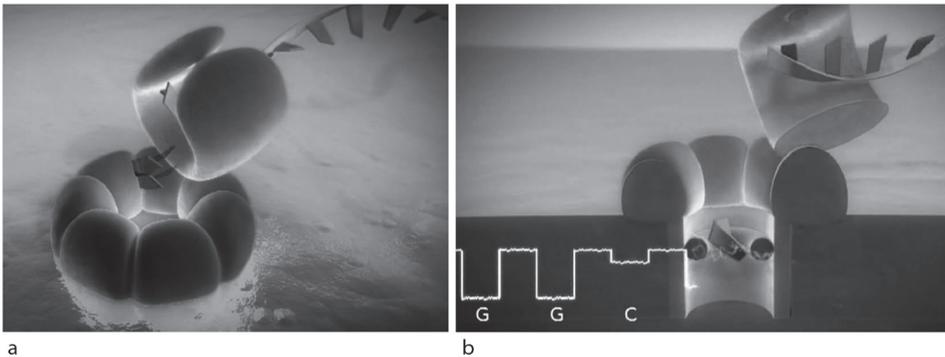


Figura 2. Secuenciación de ADN

Fuente: www.nanoporotech.com.

De esa forma el nanoporo actúa como sensor modulando el pasaje de una corriente eléctrica: al pasar una molécula a través de él se produce una disrupción característica en el flujo eléctrico, lo que permite identificar cada componente (sea un nucleótido A, T, C o G, e incluso formas metiladas de C en una secuencia de ADN). Por lo tanto, este sistema de detección no requiere el uso de fluorocromos o dispositivos ópticos, lo que reduce los costos de

operación. Sin embargo, su principal ventaja es que no requiere la síntesis de una copia para determinar la secuencia de cada molécula de ADN. El proceso de análisis se basa en la remoción de sucesivos nucleótidos mediante una enzima exonucleasa unida a cada nanoporo. En otras palabras, la exonucleasa «corta» nucleótidos del ADN que van cayendo a través del nanoporo y son «leídos» como cambios en el flujo eléctrico sentido por dicha estructura; una vez más, este tipo de nanotecnología resulta altamente paralelizable al incorporar miles de nanoporos en un mismo chip.

A partir de estos impactantes avances en la capacidad de secuenciación podemos compartir la visión de estar al comienzo de una era sin precedentes en el campo de las biociencias, que permitirá abordar problemas que parecían inalcanzables hasta ahora a través de la integración de equipos con capacidades y saberes que previamente parecían distantes e incluso incompatibles entre sí, y donde parece confirmarse la afirmación del Prof. François Jacob en cuanto a que en biología muchas veces la herramienta precede a la elaboración del concepto. Y en este caso las herramientas —instrumentos de secuenciación a escala nanométrica— ya se encuentran en el mercado desde principios del 2010: Pacific Biosciences informó en febrero pasado sobre las instituciones que inicialmente están evaluando este sistema —Baylor College of Medicine, the Broad Institute of MIT and Harvard, Cold Spring Harbor Laboratory, the U.S. Department of Energy Joint Genome Institute, The Genome Center at Washington University, Monsanto Company, The National Cancer Institute/SAIC-Frederick, The National Center for Genome Resources, The Ontario Institute for Cancer Research y Stanford University—, lo que indica el interés estratégico de diversas instituciones e industrias en acceder a las capacidades ofrecidas por esta tecnología.

7.4. Biotecnología genómica: la información del ADN puesta en perspectiva

La propia definición de biotecnología —cualquier aplicación tecnológica que usa sistemas biológicos, organismos vivos o derivados, para generar o modificar productos y procesos para usos específicos— implica que las investigaciones, los desarrollos, procesos o productos biotecnológicos surjan necesariamente de la integración de diferentes disciplinas y capacidades para la resolución de problemas de interés social y económico. Los avances registrados en áreas como la ingeniería genética, la informática, las nanotecnologías y otras han hecho posible comprender, diseñar y desarrollar

productos y aplicaciones innovadores que se han trasladado rápidamente del laboratorio a la industria.

El desarrollo de innovaciones biotecnológicas a partir de los avances en el conocimiento de los genomas de diferentes organismos —apoyado en la integración de diversos enfoques bioinformáticos, de biología molecular y de biotecnología— aparece como una estrategia común a diversos sectores (salud humana y animal, ambiente, energía) y a diferentes cadenas de valor (agropecuarias y agroindustriales). Entre las posibles aplicaciones que podrían desarrollarse a partir del acceso a capacidades de secuenciación e interpretación de información genómica podemos destacar las siguientes:

- a. análisis de especies nativas con potencial para descubrimiento de genes relevantes para aplicaciones biotecnológicas en el sector agropecuario —por ejemplo, a partir de especies de microorganismos fijadores de nitrógeno o solubilizadores de fosfatos en suelos con diferentes usos o a partir de especies vegetales que producen compuestos bioactivos antimicrobianos o con aplicaciones como fitoterápicos— y agroindustrial —por ejemplo, a partir de microorganismos extremófilos con aplicaciones en diferentes bioprocesos (desarrollo de biocombustibles, nuevos biomateriales y sistemas de biorremediación ambiental);
- b. análisis de especies de patógenos y parásitos que afectan en forma particular la salud humana y los sistemas productivos en nuestra región, como base para el desarrollo de nuevos productos y servicios biotecnológicos (aplicaciones en estudios epidemiológicos, nuevos diagnósticos y procedimientos terapéuticos, nuevos métodos para selección de cultivos y animales más tolerantes a patógenos y parásitos);
- c. análisis de especies de plantas y animales que representan la base de diferentes sistemas productivos (pasturas, arroz, bovinos, ovinos, etcétera) para las cuales se dispone de referencias genómicas a nivel internacional (proyectos genoma completos, colecciones de EST, etcétera), donde se dispone de germoplasma localmente adaptado y por lo tanto es posible hacer estudios genéticos comparativos que contribuyan al mejoramiento de dichas especies;
- d. metagenómica aplicada al monitoreo de recursos hídricos y edáficos, a través de una definición sumamente precisa de los microorganismos existentes en cada muestra y sus funciones metabólicas más relevantes en determinados ambientes;

- e. estudios de consorcios microbianos (incluyendo producción de enzimas) utilizados en aplicaciones industriales y ambientales vinculadas con procesamiento de biomasa, y
- f. detección de genes expresados anormalmente durante diversas patologías, que podrían utilizarse como referencias para diseñar nuevos métodos diagnósticos y orientar el desarrollo de biofármacos.

7.5. Explorando oportunidades en la frontera nano-bio

En la era posgenómica —que puede definirse para cada especie a partir de la publicación de su genoma completo— la investigación sobre aspectos biológicos clave requiere un importante apoyo de procedimientos basados en tecnologías de la información para evitar ser «sumergidos» por la enorme cantidad de datos experimentales generados sobre las secuencias genómicas completas de una variedad de organismos, y al mismo tiempo avanzar en la comprensión del repertorio de genes requeridos para la vida, incluyendo su diversidad alélica en diferentes poblaciones adaptadas a diferentes ambientes. En dicho contexto es posible prever un creciente desarrollo de aplicaciones tecnológicas derivadas del conocimiento sobre la organización y el funcionamiento del genoma de numerosos organismos, incorporando estrategias de I+D centradas en promover las capacidades para identificar genes propios del germoplasma adaptado a diferentes ambientes productivos, a través de metodologías de análisis genómico innovadoras con fuerte apoyo de biología de sistemas y enfoques bioinformáticos asociados.

Las investigaciones biológicas en el campo genómico están utilizando en forma creciente una aproximación al desarrollo de hipótesis basada en la propia estructura de los datos, inferida mediante diferentes procedimientos multivariados de tipo exploratorio, por lo que uno de los principales desafíos para el campo bioinformático es la exploración y representación del conocimiento subyacente en las bases de datos genómicos disponibles para anotación de genes en diferentes especies. A partir de este argumento resulta evidente que el cuello de botella actual —y proyectado— no sería la generación de datos sobre secuencias de uno o varios individuos de una determinada especie, sino la capacidad para anotar, interpretar y hacer uso de la información genómica disponible. En ese sentido existen amplias oportunidades tecnológicas para la utilización de nuevos enfoques bioinformáticos que permitan identificar diferentes secuencias de ADN y

asignarlas a un conjunto de categorías funcionales relevantes en el contexto de anotación de genes, utilizando procedimientos de minería de datos para integrar diferentes clases de información (molecular, bioquímica, agronómica, etcétera) como parte del diseño y la evaluación de prototipos aplicables en identificación y selección de genes que permitan mejorar la adaptabilidad de los cultivos a las condiciones estresantes asociadas con el cambio climático.

Como referencia respecto a las oportunidades de desarrollo científico y tecnológico que ofrece el campo genómico-bioinformático respecto a diversos tipos de investigaciones biotecnológicas, en Uruguay debe destacarse la conformación de un espacio de articulación denominado Alianza Uruguay Genoma (AUG), a partir de los aportes de diversas instituciones públicas y personas (investigadores, tecnólogos y estudiantes de biociencias y biotecnología). En ese sentido AUG apunta a facilitar la instalación, coordinación y gestión de capacidades instrumentales y humanas para la generación, el análisis y el uso de información genómica para un conjunto de especies (genomas o transcriptomas) o comunidades de organismos (metagenomas) de interés productivo y que asimismo representan sistemas biológicos de considerable interés para investigaciones fundamentales. En perspectiva, resulta imprescindible avanzar en la integración entre capacidades, generación de conocimientos y soporte al desarrollo de innovaciones tecnológicas, así como generar espacios sociales que faciliten la gestión de acuerdos —y discrepancias— entre diferentes actores institucionales y empresariales que aportan a la construcción del Uruguay innovador, como parte de las estrategias requeridas para insertarnos sosteniblemente en una *economía del conocimiento* donde la convergencia entre instrumentos nanotecnológicos y aplicaciones biotecnológicas ya es parte de la realidad.

Bibliografía

LIU, G. (2009). «Applications and case studies of the next-generation sequencing technologies in food, nutrition and agriculture. Recent Patents on Food», *Nutrition & Agriculture*, n.º 1, pp. 75-79.

MARTÍNEZ, D. A., y M. A. NELSON (2010). «The Next Generation Becomes the Now Generation». *PLoS Genetics*, 6-4, e1000906.

RICHTER, B. G., y D. P. SEXTON (2009). «Managing and Analyzing Next-Generation Sequence Data». *PLoS Computational Biology*, 5-6, e1000369.

WOOLEY, J. C., A. GODZIK e I. FRIEDBER (2010). «A Primer on Metagenomics». *PLoS Computational Biology*, 6-2, e1000667.

Capítulo 8

Interpretaciones y desafíos locales de la investigación y desarrollo en nanotecnología³¹

Adriana Chiancone³²

8.1. Introducción

Este trabajo presenta algunas de las interpretaciones de los investigadores uruguayos sobre las oportunidades que ofrece el trabajo en nanociencia y nanotecnologías, así como las principales estrategias implementadas para el desarrollo de las actividades tecnocientíficas en un contexto de grandes limitaciones, y los desafíos y riesgos asociados a ellas.

En medio de un explosivo crecimiento internacional del campo, y ante la falta de una política pública de financiamiento nacional para la nanotecnología en Uruguay, surgen un conjunto de preguntas y la consideración de algunos temas relevantes para la definición de políticas públicas, tanto de ciencia, tecnología e innovación como de educación superior.

8.2. Nanotecnología y desafíos en la periferia

El trabajo en el campo de la nanociencia y las nanotecnologías —a las que nos referiremos como nanotecnología (NT)—, con el estudio y la manipulación de átomos y moléculas, resulta sumamente atractivo para los investigadores de un conjunto de disciplinas y representa una aproximación a entidades cada vez más pequeñas de la materia, así como nuevas y

31 Basado en la ponencia presentada en el III Simposio Nacional de Tecnología e Sociedade, organizado por ReLANS, Curitiba, noviembre de 2009.

32 Docente e investigadora de la Universidad de la República, investigadora del SNI-ANII - Uruguay, integrante de ReLANS. Correo electrónico: achiancouniversidad@gmail.com.

revolucionarias potencialidades basadas en las diferentes propiedades que presenta la escala nano.

El reconocimiento de la relevancia de este campo para el crecimiento y la competitividad de los países puede ser visualizado, entre otras vías, en su incorporación en la agenda de las agencias internacionales, y en el hecho de haber sido seleccionada como una de las áreas a financiarse en las convocatorias de las principales organizaciones, como la del 7.º Programa Marco de la Unión Europea (2007-2013), por ejemplo.

Uruguay, un país de «indigencia innovadora» (Bértola y otros, 2005), ha experimentado, a partir del 2005, un profundo cambio en materia de estrategias y diseño de instrumentos para estimular el desarrollo de las actividades de ciencia, tecnología e innovación.³³

En el año 2008 la Unión Europea donó ocho millones de euros a Uruguay para el Programa Innova, orientado a apoyar la innovación en áreas definidas como estratégicas para la economía nacional, a través de ayudas a centros de excelencia, formación de recursos humanos, actividades de investigación y desarrollo (I+D) y mejora de la productividad de las empresas, entre otros. El aporte local sería de cuatro millones y medio. Esta experiencia, con una modalidad de apoyo presupuestario directo, sería una de las primeras de la Unión Europea en América Latina, e inédita en Uruguay.³⁴

La nanotecnología ha sido incluida como área transversal prioritaria en el documento *Bases y lineamientos del Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación* (Gabinete Ministerial de la Innovación, 2009). Sin embargo, no cuenta con una política nacional de financiamiento.

En el año 2006 se creó en el país un grupo de 17 investigadores del campo de la NT llamado Grupo Nanotecnología Uruguay (GNanotec-Uy). Sus integrantes pertenecían mayoritariamente a la Universidad de la República (UdelaR) y en menor medida al Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE). En el 2009 ese primer conjunto de investigadores locales se constituiría el Centro Interdisciplinario en Nanotecnología y Química y Física de Materiales (CINQUIFIMA). Dicho centro es un proyecto de trabajo (2009-2014) seleccionado en una convocatoria de UdelaR para integrar el Espacio Interdisciplinario de la institución.

En el contexto local de actuación de los investigadores se dan diversas situaciones y restricciones propias de los ámbitos de investigación y desarrollo

33 Véase «Historia del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay» en esta publicación.

34 Entre los destinatarios de estos fondos se encontraban el Instituto Pasteur de Montevideo, el Polo Tecnológico de Pando, el Centro de Ensayos de Software y los clusters del Programa Pacpymes (Presidencia de la República, 2008).

(I+D) de la región, que conducen a la formulación de un conjunto de preguntas y a la consideración de algunos temas relevantes a la hora de definir políticas públicas, tanto de ciencia, tecnología e innovación como de educación superior, que garanticen el financiamiento de estas iniciativas, la formación de recursos humanos y su inserción laboral, entre otros desafíos.

8.3. Crisis y nuevos campos, ¿oportunidades para la innovación?

El informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2009) nos ponía en alerta acerca de los riesgos de que la innovación pudiese verse afectada por la crisis económica, dado que el capital destinado a ese fin había disminuido. En treinta países de la OCDE hubo recortes en los estímulos y en las medidas dirigidas al desarrollo futuro en ciencia, innovación y *green technology*.

Siguiendo la tendencia de lo ocurrido en crisis anteriores (la de principios de los 90 y la de comienzos del 2000), las inversiones en I+D se habrían reducido: el capital de riesgo descendió un 60 % en Estados Unidos en el primer trimestre del 2009; en Europa y China también. El organismo internacional, con base en las experiencias de Finlandia de comienzos de los 90 y de Corea de principios de los 2000 —cuyos gobiernos aumentaron sus inversiones en I+D en plena crisis con excelentes resultados para sus economías en materia de innovación y competitividad—, hacía un llamado a los gobiernos a controlar la reducción en las inversiones en I+D y atenuar los impactos negativos de la crisis en la innovación.

Se planteaba también que la crisis ofrecería oportunidades para desarrollar innovación para un crecimiento sostenible, pero exigiría estrategias de crisis adecuadas y coherentes. Se destacaba que muchos gobiernos habían incorporado medidas para reformar la innovación en sus paquetes de estímulos y podrían también llegar a mejorar su potencial de innovación a largo plazo. Con relación a la NT, cabe subrayar que Francia estaba planeando promover la investigación en esta área con una inversión de 70 millones de euros (OECD, 2009).

El escenario de crisis económica era valorado como una oportunidad para la innovación por algunos de los investigadores uruguayos. Uno de ellos expresaba:

Es un momento económico a nivel mundial con desaceleraciones y frenos. La nanotecnología es un área que verá resentido su desarrollo por la crisis que vivimos. Eso que a nivel global puede

resultar malo, nos está dando más espacio para «subirnos al tren», porque acá es todo más despacio [...] Uruguay puede aprovechar estas circunstancias. (Mombrú, 2009)

Esta interpretación coincide con planteos de autores latinoamericanos que reconocen la necesidad de que América Latina comience un proceso de construcción de capacidades tecnológicas en las industrias de procesamiento asociadas a la biología y los materiales, como preparación para ingresar con ciertas ventajas en áreas como la biotecnología, la nanotecnología, los nuevos materiales y energías, que integrarían la nueva revolución tecnológica. Estos desarrollos deberían llevarse a cabo con el apoyo de las exportaciones de materias primas como plataforma y como fuente de financiamiento (Pérez, 2008).

8.4. Construcción de capacidades locales

Entre los investigadores existe una fuerte confianza en las capacidades del capital humano disponible. Como lo expresó una de las integrantes del grupo:

[...] lo más importante que tenemos es el capital humano, la gente que tenemos está muy preparada, es gente muy capaz, está en contacto constante con otros países, con desarrollos y avances en materia de nanotecnología. (Pereira, 2007)

Se están procesando diversas iniciativas locales de formación avanzada en NT, con diferentes orientaciones —en el ámbito del recientemente creado Centro Interdisciplinario en Nanotecnología y Química y Física de Materiales de la Universidad de la República— asociadas a programas internacionales, y también instancias de especialización.³⁵ Estas iniciativas son positivas y muy necesarias para consolidar las condiciones de producción en el campo.

Años atrás un grupo de NT concursó en el 7º Programa Marco de la Unión Europea, y resultó seleccionado con otros de la región. En este ámbito se formó EULASUR, una red de materiales avanzados y nanomateriales de interés industrial entre Europa y países del MERCOSUR (Argentina, Brasil, y Uruguay) con una duración de treinta meses (2009-2012). El objetivo principal de esta iniciativa de vinculación es la creación de una plataforma de cooperación para formar consorcios entre científicos, gestores de ciencia, decisores de políticas,

35 Como el curso interdisciplinario Bases de la Nanociencia, de las áreas de biología, física y química del Programa de Desarrollo de Ciencias Básicas (PEDECIBA). Este curso fue realizado en el IIBCE con el apoyo del PEDECIBA y de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) del 5 al 9 de octubre 2009.

expertos industriales y de transferencia tecnológica en la Comunidad Europea y los tres países latinoamericanos (Comunidad Europea, 2007).³⁶

La creación de capacidades tecnológicas locales ha sido considerada por diferentes autores como una necesidad para los países en desarrollo debido a su relevancia en varios aspectos. Entre otros:

- para la modificación y adaptación de tecnología existente en otras partes del mundo, así como para la creación de nueva;
- para la adecuada evaluación, elección, negociación e importación de tecnología;
- por la naturaleza acumulativa de los efectos del aprendizaje tecnológico, con un pasaje a niveles de mayor complejidad y desarrollos más sofisticados y rentables;
- para el monitoreo y la vigilancia tecnológicos en pos de la incorporación de los avances a tecnología original (Kumar y Siddharthan, 1997: 3-4; Enos, 1991).

Sin embargo, la formación avanzada de investigadores en campos como la NT en los países de la periferia está en la actualidad directamente asociada a cuestiones tales como su rol en el desarrollo —es decir, la función de estos recursos humanos altamente calificados en los desarrollos socioeconómicos locales, su inserción laboral y la orientación de las actividades de I+D—. También a la conocida fuga de cerebros (*brain drain*), padecida por gran parte de las naciones del mundo.

8.5. Estrategias de los investigadores: continuidad e innovación

Como en otros campos disciplinarios, la importancia de la internacionalización de la actividad tecnocientífica es creciente. La participación en redes, grupos de investigación, movilidad académica y cooperación internacional, entre otras, representan diversas modalidades de relacionamiento con los colegas de la región y de los países centrales. En particular, la vinculación con los centros de producción del sistema internacional de ciencia por medio de la movilidad académica ha sido una

36 «Los objetivos del proyecto fueron diseñados para obtener conocimiento de primera mano del estado del arte de la investigación en estos campos, por medio de escuelas de verano, intercambios y acciones compartidas. El proyecto se dirige también a los aspectos sociales, políticos y culturales que impactan la transferencia tecnológica entre Europa y los países de Brasil, Argentina y Uruguay» (CORDIS, s/f).

estrategia desarrollada por los investigadores uruguayos de diferentes campos disciplinarios desde tempranas épocas (Chiancone, 1997).

En la actualidad los investigadores participan en redes con grupos internacionales, en el ámbito de las cuales se desarrollan varios proyectos. Entre otros, las colaboraciones se establecen con grupos de la Universidad Federal de Santa Catarina y la Universidad Federal de São Carlos de Brasil, la Universidad de Quilmes y la Universidad Nacional de la Plata de Argentina; también con otras instituciones de la Red de Macrouiversidades de América Latina y el Caribe.

Estas colaboraciones científicas han generado publicaciones uruguayas en coautoría. Un análisis de datos extraídos de las bases sobre publicaciones y patentes del Georgia Tech brinda una aproximación a la visibilidad internacional de estas y a la distribución por país de origen de los coautores.

Del total de cincuenta y cuatro artículos publicados en nanotecnología para el período entre 1990 y mediados del 2006, casi un 80 % serían trabajos en coautoría con grupos internacionales, de los cuales un 37 % corresponde a colaboraciones con centros internacionales líderes; 48,1 % a coautorías intra-Mercosur y 5,6 % a colaboraciones nacionales entre los grupos de las dos instituciones académicas que desarrollan esta área. El casi 15 % restante de las publicaciones serían trabajos de una única institución local (Kay y Shapira, 2008). De acuerdo a los datos que se exponen en la tabla 1, la distribución de las publicaciones en coautoría con otros países presentaría un valor máximo en las colaboraciones con Chile, seguido por las realizadas con Brasil.

Tabla 1. Publicaciones uruguayas en NT, en coautoría con otros países (en %). Período 1990-mediados de 2006

	Uruguay
Brasil	14,8
Argentina	9,3
Chile	24,1
Estados Unidos	11,1
Francia	5,6
España	11,1
Alemania	0,0
Italia	5,6
Inglaterra	1,9
Japón	1,9
Canadá	0,0
Cuba	0,0
Rusia	0,0
Portugal	0,0
Bélgica	1,9
México	0,0
China	1,9

Fuente: Kay y Shapira, 2008.

En el contexto de una creciente internacionalización de la educación superior tiene lugar un aumento de la movilidad y la migración de científicos e ingenieros (en algunos casos para la formación de posgrado fuera de sus países de origen), y a estos fenómenos se asocia una mayor circulación de información en ciencia e ingeniería. Las redes de científicos e ingenieros expatriados con sus países de origen, así como la cooperación internacional que tiene lugar en el contexto de programas universitarios de ciencias e ingenierías, representan un elemento de importancia en estas dinámicas (Johnson, 2000; Chiancone y Martínez Larrechea, 2009).

Si bien en el primer aspecto se han realizado importantes esfuerzos en pro de la formación avanzada en nuestra región, estos todavía son insuficientes. En cuanto al segundo aspecto, cabe subrayar los riesgos del *brain drain* de las capacidades existentes, especialmente en áreas estratégicas como las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (NTIC) o la NT.

A esto se suma, paradójicamente, el hecho de que las universidades con mayor desarrollo de las actividades de investigación de la región, son las instituciones que más participan en las redes internacionales de investigación de mayor relevancia (Vessuri, 2007).

8.6. Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva

Un componente fundamental del trabajo local desarrollado en NT es el del monitoreo y el seguimiento minucioso de los desarrollos en el mundo, facilitado por el reciente acceso a bases de datos a través del nuevo portal Timbó de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII).³⁷

Estos esfuerzos sostenidos serían, según Dahlman y otros (1987), relevantes para la conformación de las capacidades tecnológicas, además de la acumulación de otras habilidades y las respuestas a las nuevas demandas, presiones y oportunidades.

El trabajo de vigilancia tecnológica está asociado, en la estrategia desarrollada por los investigadores uruguayos, a una continua producción en los nichos evaluados como competitivos, buscando también una considerable diversificación temática. La elección se basa en riesgos mínimos y beneficios máximos, para evitar cuellos de botella, en función de la viabilidad en el contexto local y la repercusión nacional e importancia de sus posibles aplicaciones, que conducirían al apoyo de las empresas públicas o privadas.

37 El portal TIMBO (Trama Interinstitucional y Multidisciplinaria de Bibliografía On-line), comenzó a funcionar el 1 de enero de 2009 en el ámbito de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), permitiendo el acceso universal en línea a la bibliografía científico-tecnológica internacional y a los bancos de patentes.

8.7. Conclusiones

- La NT ha sido reconocida en Uruguay como un área transversal estratégica para el desarrollo local, en el documento de bases y lineamientos del Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCTI, 2009).
- Los practicantes del campo han ganado espacios institucionales y un creciente reconocimiento de la relevancia de su trabajo.
- No existe una política pública de financiamiento nacional para la Nanotecnología en Uruguay; el desarrollo de capacidades tecnológicas y actividades de I+D ha sido financiado con los recursos obtenidos por concurso en convocatorias locales, universitarias, y de la ANII. La cooperación internacional representó un aporte relevante.
- El contexto actual de emergencia de la NT, así como el de la crisis internacional, son interpretados por muchos de los investigadores como oportunidades para los países con poco desarrollo en ese campo.
- La ampliación de la escala de investigación a través de redes abre un nuevo panorama de movilidad y colaboraciones científico tecnológicas, a la vez que de desafíos y riesgos, especialmente los relacionados a dos aspectos, la fuga de cerebros (*brain drain*), y la orientación del trabajo de I+D.
- En este contexto surgen algunas preguntas relevantes relativas al desarrollo local de la NT en contextos con muchas carencias, como el del caso uruguayo analizado. Entre otras:
 - a. ¿Cuáles son los desafíos asociados a la formación de investigadores?
 - b. ¿Cuál es la demanda real y potencial del sector productivo, que garantice la inserción laboral de estos recursos, más allá de los ámbitos académicos?
 - c. ¿Cuál es el rol de las empresas públicas en este sentido?

Bibliografía

BÉRTOLA, L., H. WILLEBALD, P. DARSCHT, M. SNOECK, L. PITTALUGA, A. DAVYT, C. ROMÁN, C. BIANCHI y N. REIG (2005). *Ciencia, tecnología e innovación en Uruguay: diagnóstico, perspectivas y políticas*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Serie de Notas de Referencia RE1-RN-05-001.

CHIANCONE, A. (1997). «Los matemáticos uruguayos, una historia de migraciones». *Redes*, vol. 4, n.o 10, pp. 179-212.

CHIANCONE, A., y E. MARTÍNEZ LARRECHEA (2009). «Nuevos territorios y fronteras del conocimiento: desafíos de la formación avanzada en América Latina». *Revista Sudamericana de Educación, Universidad y Sociedad*, n.o 1, pp. 117-123.

COMUNIDAD EUROPEA (2007). *INNOVA. Uruguay. Cooperación Inteligente para Uruguay*.

CORDIS (s/f), http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=proj.document&PJ_RCN=10760321 (última consulta:15/6/ 2012).

DAHLMAN, C. J., B. ROSS-LARSON y L. WESTPHAL (1987). «Managing Technological Development: Lessons from the Newly Industrializing Countries». *World Development*, vol. 15, n.o 6, pp. 759-775.

ENOS J. L. (1991). *The Creation of Technological Capability in Developing Countries*. Londres: Pinter.

GABINETE MINISTERIAL DE LA INNOVACIÓN (2009). *Bases y principales lineamientos. Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCTI)*, <http://www.delury.ec.europa.eu/contenidos/index.php?ld=1838> (última consulta:23/1/2010).

JOHNSON, J. (2000). «International Mobility of Doctoral Recipients from U.S. Universities». Council of Graduate Schools. 40th Anniversary Meeting. Nueva Orleans, 9-5 de diciembre.

KAY, L., y P. SHAPIRA (2008). «Developing Nanotechnology in Latin America». *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 11, pp. 259-278.

KUMAR, N., y N. S. SIDDAHARTHAN (1997). *Technology, market structure, and internationalization: issues and policies*. Nueva York: Routledge.

MOMBRÚ, A. (2009). Curso Nanotecnología y Sociedad, Centro Cultural de España, Montevideo, 15 de mayo.

OCDE (ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO) (2009). «Policy Responses to the Economic Crisis: Investing in Innovation for Long-Term Growth», www.oecd.org/dataoecd/59/45/42983414.pdf (última consulta:15/6/2012).

PEREIRA, M. (2007). «Un campo científico en expansión». Entrevista a Mariana Pereira por J. M. Petit, *El Espectador.com*, 8 de junio.

PÉREZ, C. (2008). «Una visión para América Latina: dinamismo tecnológico e inclusión social mediante una estrategia basada en los recursos naturales». Presentado en el Programa ECLAC, 5 de julio.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA (2008). *Uruguay cambia*, 3-62 - 10 de abril: 2. http://www.presidencia.gub.uy/_web/uruguay_cambia/boletin/pdf/u_cambia_062.pdf(última consulta:15/6/2012).

UNIÓN EUROPEA (2009). EULASUR, http://eup.desy.de/fp7/fp7__projects/eulasur/index_eng.html (última consulta:23/1/2010).

VESSURI, H. (2007). «La formación de investigadores en América Latina y el Caribe». Presentación en el Seminario Regional *Políticas de investigación y enseñanza superior para transformar a las sociedades: Perspectivas desde América Latina y el Caribe*. UNESCO, Puerto España, 19-20 de julio.

Capítulo 9

Nanotecnología: continuidad y ruptura

María Brum³⁸

9.1. Introducción

En la naturaleza siempre han existido materiales en escala nanométrica: por ejemplo, en la combustión de carbón y madera los residuos contienen gran cantidad de nanopartículas de carbono, mientras que en la niebla las gotas tienen escalas nanométricas. Dice P. Siegmann al respecto:

Cualquier persona que espera en una parada de autobús habrá sufrido una humareda emitida por algún autobús al acelerar... y en esa humareda se está emitiendo todo tipo de partículas en gran cantidad, entre ellas las nanométricas. (Siegmann y otros, 2008)

Los avances científico-tecnológicos en el siglo XX permitieron conocer que actividades humanas naturales —como la combustión del carbón, la incineración de residuos, los gases emitidos por vehículos, la quema de rastrojos, el uso de cocinas a leña, el humo del tabaco— o procesos de origen natural —como las emisiones volcánicas— generan nanopartículas. Lo que ha cambiado sustancialmente es, por un lado la exposición del ser humano a estas sustancias, que se ha incrementado como consecuencia del desarrollo industrial del siglo XX, y, por otro, los avances de la ciencia y la tecnología que caracterizaron ese siglo.

El primero en utilizar el término *nanotecnología* fue el físico japonés Norio Taniguchi, de la Tokyo Science University, en un trabajo denominado *On the basic concept of nano-technology* (Taniguchi, 1974), expuesto en 1974 en la International Conference of Production and Engineering, que se aplicó

38 Profesora adjunta en Ciencia, Tecnología y Sociedad, DISI, Facultad de Ingeniería, UDELAR. Correo electrónico: mbrum@fing.edu.uy.

en el campo de la microelectrónica para describir el modelo que introduce la precisión en la fabricación. Pero el punto de ruptura o inflexión conceptual que permitió abordar esta nueva rama se identifica con la conferencia brindada por el físico norteamericano Richard Feynman en 1959, titulada «There is plenty of room at the bottom» (Feynman, 1959). En dicha conferencia decía Feynman:

Los principios de la física, tal como yo los entiendo no dicen nada en contra de la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo. [...] Los problemas de la química y la biología saldrían sumamente beneficiados si se desarrollase en última instancia nuestra capacidad para [...] ver las cosas en un nivel atómico [...] No puedo entrever exactamente qué pasaría, pero no me cabe la menor duda de que cuando tengamos algún control de las disposiciones de las cosas a pequeña escala obtendremos un espectro enormemente mayor de posibles propiedades que las sustancias puedan tener [...] — algo que se está desarrollando y, que en última instancia no puede soslayarse [...] ¿no hay manera de hacer un microscopio electrónico más potente? (Feynman, 1959)

Solo los descubrimientos y avances tecnológicos alcanzados en los años siguientes relacionados básicamente con las herramientas experimentales que hicieron posible «ver» y manipular los átomos permitieron pasar estos conceptos desde el plano científico y el círculo de los centros de investigación hacia visiones concretas de futuro. Es el caso de los publicados en 1986 por Erik Drexler en el MIT, donde por primera vez se plantea la denominada *nanotecnología molecular* (Drexler, 1986).

Los inventos y descubrimientos más significativos que permitieron el avance de las nanotecnologías fueron (Stix, 2001; AA. VV., 2002; Holister, 2002):

- La invención del microscopio de barrido de efecto túnel, en 1981.³⁹ A partir de ese momento se hizo posible «observar» lo que se manipula, lo que produjo un salto cualitativo y cuantitativo en la comprensión científica y la utilización tecnológica de la actividad a escala nano.
- La invención del microscopio de fuerza atómica, en 1986. A diferencia del microscopio de barrido, este detecta los efectos de

39 Dispone de una sonda que en su extremo mide solo un átomo y permite reproducir la topografía atómica de la muestra, pero su uso está limitado a materiales que conduzcan una pequeña corriente eléctrica. Esto deja fuera de su alcance las muestras biológicas. Sin embargo, a manera de ejemplo, este instrumento fue suficiente para que los científicos de IBM recogieran uno a uno 35 átomos de xenón con la punta del microscopio y los dispusieran en la superficie de un cristal de níquel dibujando la sigla IBM. El logotipo mide menos de 3 nm (puede verse una imagen en www.almaden.ibm.com/vis/stm/images/ibm.tif).

las fuerzas atómicas y puede operar con muestras de materiales no conductores, como muchas muestras biológicas.

- El descubrimiento, en 1985, de los fullerenos (buckminsterfullerenos o *buckyballs*), jaulas esféricas de enlaces estables con 60 átomos de carbono que miden aproximadamente 1 nm. Se descubría un nuevo compuesto nanométrico en forma pura y estable de carbonos, al igual que el diamante y el grafito, hasta el momento las dos únicas formas alotrópicas del carbono conocidas. El descubrimiento abrió un campo de posibles aplicaciones en la elaboración de nuevos tipos de polímeros, superconductores, estructuras con metales o con otros átomos atrapados dentro de estos agrupamientos de carbono, así como nuevos catalizadores, productos farmacéuticos y otras posibles aplicaciones industriales.
- El descubrimiento en 1991 de los nanotubos de carbono, tubos de paredes simples o múltiples descubiertos por Sumio Iijima, físico japonés de la NEC. Este ha sido uno de los descubrimientos de mayor trascendencia en el desarrollo de la nanotecnología. Los nanotubos de carbono poseen una fortaleza superior a la del acero, tienen propiedades eléctricas inusuales (como comportarse como hilos cuánticos capaces de transportar altas densidades de corriente sin disipación y con independencia del largo del tubo, mientras que los alambres de cobre convencionales se funden al llegar a densidades de corriente mil veces inferiores). Además permiten encapsular otros materiales, lo cual posibilita su uso en el campo de la salud, la informática o la electrónica.
- El anuncio de IBM, en el 2002, del desarrollo de un nuevo microscopio electrónico con un poder de resolución que alcanza el radio de un solo átomo de hidrógeno. Entre otras cosas, este instrumento permitirá corregir defectos de nivel atómico.
- Importa agregar que ya en 1964 el Premio Nobel de Química Glenn Seaborg —consejero científico sobre energía nuclear de diez presidentes, desde Truman hasta Clinton— patentó dos elementos descubiertos por él e incluidos en la tabla periódica de los elementos. Se trataba de patentar elementos básicos de la estructura de la materia, lo cual supone la apropiación de recursos naturales y sienta un precedente que puede tener graves

derivaciones industriales, comerciales y financieras que contribuyan a agudizar las desigualdades de las sociedades a nivel mundial.⁴⁰

9.2. Propiedades de los sistemas a escala nanométrica

Las causas por las que las propiedades de los sistemas se modifican en la nanoescala no constituyen descubrimientos nuevos, ya que el conocimiento de las propiedades atómicas, las interacciones a nivel de partículas atómicas y moléculas y el nacimiento y perfeccionamiento de la mecánica cuántica se desarrollaron en la primera mitad del siglo XX. Pero importa destacarlas:

1. El incremento de la superficie relativa de las partículas: un elemento visible tiene determinada superficie; a medida que lo disgregamos crece la superficie por unidad de masa. Esto reviste gran utilidad debido al cambio de propiedades en materiales tales como las cerámicas y los metales. (Las esponjas de aluminio son un ejemplo bien conocido.)
2. A nivel de las partículas reducidas a dimensiones propias de la nanoescala predominan los efectos cuánticos, lo cual hace posible la aparición de cambios cualitativos en las propiedades de la materia (lo que podría dar lugar a una especulación filosófica acerca de la transformación de los cambios cuantitativos en cualitativos).
3. En un sentido amplio del término y operando en dimensiones nanoescalares, se considera nanomaterial todo producto que tenga al menos una de sus dimensiones menores de 100 nm. En tal sentido es posible producir materiales unidimensionales (recubrimientos muy finos de superficies), bidimensionales (nanotubos o nanocables) y tridimensionales (nanopartículas).⁴¹ Este criterio se usa en fisicoquímica coloidal. Un coloide es una sustancia con propiedades peculiares porque en alguna de sus dimensiones tiene un nivel nanométrico.

40 Este problema no surge con la nanotecnología. Hace años que se discute el derecho de propiedad de los países sobre sus recursos naturales. De hecho, los países desarrollados que cuentan con tecnologías avanzadas se han arrogado el derecho de expropiar recursos, devastar el suelo, contaminar el ambiente a costa del atraso y la propia vida de las poblaciones autóctonas.

41 El sentido amplio del término hace posible la existencia de otras definiciones. Por ejemplo, dado que los nanotubos suelen presentar una elevada relación longitud/radio, ya que el radio suele ser inferior a un par de nanómetros y la longitud puede llegar a los 105 nm, se puedan considerar también como unidimensionales.

9.3. Ejemplos de aplicaciones beneficiosas más inmediatas

Señalaremos algunos de los muchos ejemplos de aplicaciones beneficiosas de las nanotecnologías.

- En la salud; sistemas destinados a hacer llegar moléculas activas directamente hacia el *target*, con precisión en las dosis y los momentos adecuados, adicionando receptores sobre la superficie, encapsulando las moléculas en nanomateriales y disponiendo nanosensores (biosensores); utilización del ADN para la construcción de dispositivos mecánicos como microchips altamente sensibles capaces de detectar necesidades concretas de un organismo vivo; desarrollo de biomembranas artificiales;⁴² filtros solares más protectores; calzado para diabéticos con nanopartículas de plata, que tienen propiedades bactericidas.
- En la vestimenta y artículos deportivos: productos multifuncionales bactericidas, desodorantes, de mayor resistencia y elasticidad.
- En la electrónica: la construcción de circuitos lógicos más pequeños y eficientes viabiliza un aumento sustancial en la capacidad de almacenamiento y velocidad de procesamiento de datos.
- En la defensa: el desarrollo de una tela inteligente para los uniformes, que copia las propiedades de la telaraña (el material más resistente y flexible que existe en la naturaleza), es importante también para uso civil.
- En la construcción: membranas para aislamiento térmico y para repeler agua; aerosoles, pinturas y otros recubrimientos más durables y resistentes.
- En algunos procesos industriales tales como sistemas de extracción de contaminantes del agua o del aire: control de la rugosidad de superficies o del espesor de filmes; obtención de materiales más resistentes y mucho más ligeros que el acero; telas repelentes a las manchas; vidrios que se limpian solos; sensores minúsculos capaces de controlar multitud de parámetros, de forma tal que muchos procesos industriales o de la vida cotidiana se hagan más precisos y seguros (conducción vial, detección contaminante).

⁴² Hay un proyecto de desarrollo conjunto entre institutos uruguayos, argentinos y brasileros (Chiancone y otros, 2008: 134). Por la parte uruguaya participan el IIBCE, el Hospital Pereira Rossell y la Facultad de Medicina.

9.4. La convergencia tecnológica

Cuando hablamos de convergencia nos referimos a la confluencia actual de avance en el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Escobar señala:

La convergencia de tecnologías no es algo nuevo. Hace 25 años [...] se señalaba que el mundo estaba siendo testigo de una serie de avances tecnológicos únicos en la historia por su intensidad, convergencia y amplio impacto, y en relación con la estructura tecnológica e industrial en que eran aplicados. [...] y enmarcó tales avances en la ingeniería genética y la biotecnología, la microelectrónica, los materiales y las tecnologías relacionadas, los productos derivados del petróleo y la energía de la biomasa y de las celdas fotovoltaicas. (Escobar, 2008: 5)

Según este autor, desde Newton —para no hurgar más lejos en el tiempo— hasta hoy, siempre habrían existido convergencias entre algunas ciencias y de ellas con diversos desarrollos tecnológicos. En tal sentido recuerda, entre otras cosas, que la formulación de las leyes de Newton acercó la física y la matemática al conducir al desarrollo del cálculo diferencial, o que la informática se abrió camino con los avances de la física del estado sólido, la microelectrónica y las matemáticas, así como la obtención y el uso de fibra óptica se unió a la utilización de satélites artificiales.

Pero existen diferencias sustanciales entre dichas convergencias y la que se desarrolla con la irrupción de la nanotecnología. Una cosa es cierto grado de solapamiento entre dos o más disciplinas que conservan sus especificidades. La convergencia tiene lugar cuando dos o más áreas distintas de ciencia y tecnología pasan a ser estudiadas conjuntamente, para una finalidad común. En cambio, lo que está surgiendo en los últimos decenios es una convergencia cualitativamente diferente, pues da lugar —con diferentes niveles de desarrollo— a una nueva unidad de varias ciencias a partir de la identidad del punto de partida: los procesos nanoescalares. Estos procesos, que permiten la observación y manipulación de la materia a una escala mucho más precisa, a su vez inician una transformación sustancial de lo que es observar y manipular, de modo que cambian radicalmente la relación del hombre con su entorno y descubren cada vez más posibilidades de desarrollo material y social. Con la llegada de la nanotecnología, el avance sostenido de la ciencia y la tecnología ha dado un salto en el complejo proceso del conocimiento y de toda la actividad humana. Escobar señala en su informe:

Independientemente de estos antecedentes, la convergencia de tecnologías se ha acentuado de manera extraordinaria en los

últimos años⁴³ debido a que los adelantos en unas esferas se han constituido en elementos determinantes para avanzar en otras, manifestándose así lo que se conoce como fertilización cruzada. [...] En el caso de las NBIC,⁴⁴ la convergencia de estas cuatro áreas genera a su vez tecnologías y sistemas de conocimientos científicos que se habilitan los unos a los otros para el alcance de un propósito compartido. (Escobar, 2008: 7)

[...] no existen jerarquías [entre las disciplinas]. La vieja división entre ciencia básica e ingeniería tampoco sería aplicable, lo que hace necesario repensar la organización de la ciencia, las relaciones entre ciencia y técnica y entre ciencia, técnica y sociedad. (Escobar 2008: 12)

La manipulación nanoescalar, la fuerza unificadora de tecnologías convergentes en un sentido más estricto que el utilizado con anterioridad, ha devenido en la plataforma sobre la cual se va a desarrollar —al menos en los dos primeros decenios del siglo XXI— el conjunto de las ciencias, directa e indirectamente relacionadas. Hay una transformación y reorganización de las ciencias a lo largo de su historia de modo tal que la fragmentación anterior tiende a desvanecerse. Heisenberg plantea:

La historia de la física no es mera yuxtaposición de descubrimientos y observaciones experimentales a la cual se agregue su descripción matemática. Es también historia de los conceptos. (Heisenberg, 1979: 25)

Cuando en la ciencia los conceptos cambian de este modo, cuando cambia la naturaleza de la observación, las teorías y toda la actividad científica, se plantean nuevos problemas que procuran dar cuenta de la novedad y el cambio.

Este proceso de desarrollo de la ciencia y la tecnología en la sociedad se hace cada vez más complejo: la ciencia requiere avances tecnológicos y, a su vez, las aplicaciones tecnológicas demandan desarrollo científico. Ambos componentes (ciencia y tecnología) no pueden separarse, así como tampoco son ajenos al desarrollo social, el cual se sostiene por el complejo ciencia-tecnología. Hay una reorganización total del complejo ciencia-tecnología-sociedad que plantea el desafío de definir en cada momento las políticas necesarias para la mejora de sus relaciones.

43 Las primeras publicaciones sobre este fenómeno de la convergencia tecnológica tal y como hoy se asume aparecieron en 2003 y 2004 respectivamente. (Nota de la autora)

44 El acrónimo NBIC incluye nanotecnología, biotecnología, TIC y ciencias cognitivas.

Bibliografía

AA. VV. (2002). *Elementos iniciales para el análisis sobre la tecnología en Cuba*. La Habana: Observatorio Cubano de Ciencia y Tecnología, Academia de Ciencias de Cuba.

CHIANCONE, A., R. CHIMURIS y L. GARRIDO (2008). «La nanotecnología en Uruguay», en G. FOLADORI y N. INVERNIZZI, *Las nanotecnologías en América Latina*, México: Porrúa.

DREXLER, E. (1986). *Engines of Creation*. Nueva York: Anchor Books-Doubleday.

ESCOBAR RODRÍGUEZ, A. (2008). *NBIC - Nano, Bio, Info, Cogno. La convergencia de tecnologías*. La Habana: Observatorio Cubano de Ciencia y Tecnología, Academia de Ciencias de Cuba.

FEYNMAN, R. (1959). «There is a plenty of room at the bottom», www.zyvex.com/nanotech/feynman.html (última consulta:4/5/2010).

HEISENBERG, W. (1979). *Encuentros y conversaciones con Einstein*. Madrid: Alianza.

HOLISTER, P. (2002). *The tiny revolution*. Londres: CMP Científica.

SIEGMANN, P., F. J. ACEVEDO, K. SIEGMANN y S. MALDONADO-BASCÓN (2008). «A probabilistic source attribution model for nanoparticles in air suspension applied on the main roads of Madrid and Mexico City». *Atmospheric Environment*, vol. 42, n.o 17, pp. 3937-3948.

STIX, G. (2001). «A few 10⁻⁹ Milestones». *Scientific American*, setiembre.

TANIGUCHI, N. (1974). «On the Basic Concept of "Nano-Technology"», *Proceedings of the International Conference on Precision Engineering. Part II*. Tokio: Japan Society of Precision Engineering, <http://nanodot.org/articles/01/06/04/1217257.shtml> (última consulta:4/5/2010).

Capítulo 10

La propiedad intelectual en el cruce con la nanotecnología: reflexiones en voz alta

Ramiro Chimuris⁴⁵ y Lydia Garrido Luzardo⁴⁶

La empresa con los mejores abogados o la mayor capacidad de soportar el riesgo de la litigación ganará la guerra de la innovación, en lugar de la empresa con los científicos más brillantes o las ideas más originales y valiosas. (Jaffe y Lerner, 2004: 6)

10.1. Introducción

Según muchos autores, nos encontramos en la transición hacia una producción intensiva en tecnologías avanzadas y educación superior. Se denomina *economía intensiva en conocimiento*⁴⁷ y da cuenta de una nueva modalidad de progreso técnico como motor del desarrollo económico (Pérez, 2001; Pittaluga, 2005). El conocimiento pasa a ser entendido como la principal fuente de su dinámica.

El dominio ha cambiado de ser exclusivamente material y financiero a ser además relacional y representacional. Los elementos han cambiado de ser meramente tangibles a ser también intangibles. Las reglas han cambiado del universo de las posibilidades físicas [...] al universo de las posibilidades del conocimiento. (Carrillo, 2005: 1)

45 Doctor en Derecho y Ciencias Sociales, miembro de Plataforma DESCAM (Plataforma de Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Medioambientales). Miembro de ReLANS. Correo electrónico: ramirochimuris@gmail.com.

46 Miembro de ReLANS. Correo electrónico: lydiagarrido@gmail.com.

47 Arocena y Sutz (2003) hablan de *sociedad capitalista del conocimiento* para destacar la tendencia a la privatización del conocimiento.

Uno de los complejos problemas que genera esta economía del conocimiento es el llamado *dilema del conocimiento*, o contradicción entre la apropiabilidad del conocimiento como garantía de la innovación en una economía de mercado, y la necesaria difusión y accesibilidad del conocimiento como conquista humana y para toda la sociedad. La tensión entre bien privado y bien social se impone ahora en el orden de lo «intangible».

Estudios sobre ciencia, tecnología y sociedad (CTS) muestran cómo el desarrollo científico-tecnológico ha venido orientándose crecientemente por la demanda del mercado. El conocimiento, que es un eslabón del proceso de desarrollo científico y tecnológico, pasa a ser comandado por el mercado. Las formas de regular la apropiación del conocimiento constituyen el terreno de la propiedad intelectual (PI).

10.2. La nanotecnología

En 1959, Richard Feynman —premio Nobel de Física en 1965— pronunciaba la conferencia «There is plenty of room at the bottom» para la American Physical Society en el California Institute of Technology (CALTECH) sobre el futuro de la investigación científica. Esta puede considerarse una predicción sobre la posterior implementación y aplicación de la nanotecnología. En esa conferencia, Feynman se refería a la posibilidad de manipular átomo a átomo. Lo que en aquel momento no existía era la tecnología para llevarlo a cabo. El término *nanotecnología* fue definido por primera vez en 1974 por Norio Taniguchi —profesor emérito de la Tokyo Science University— como una tecnología de producción a la escala del nanómetro: milmillonésima parte de un metro (Taniguchi, 1974). Para avanzar del campo de las ideas al trabajo aplicado con la realidad cuántica se necesitaban nuevos instrumentos. En 1981 el microscopio de efecto túnel (STM) permitió observar una molécula con resolución atómica. En 1986 se inventó el microscopio de fuerza atómica (AFM), que habilita a manipular átomos uno a uno. A partir de entonces la nanociencia comenzó su desarrollo aplicado en forma exponencial.

La nanotecnología es considerada una tecnología disruptiva (Foladori e Invernizzi, 2006) por sus impactos sobre las formas conocidas de producción, la competencia con los productos en el mercado, los impactos sobre el trabajo y el empleo, las posibilidades que ofrece para la potenciación del cuerpo humano y su incorporación a todos los sectores económicos. Se trata de una tecnología con implicaciones en toda la sociedad, que por tanto es culturalmente disruptiva.

En el encuentro *Converging Technologies for Improving Human Performance*, llevado a cabo por la National Science Foundation en Arlington (Virginia, Estados Unidos) en junio del 2002, se analizaron los alcances de las tecnologías convergentes (NBIC). Allí se destacó la incidencia a largo plazo de esta plataforma tecnológica sobre áreas clave de la actividad humana, incluidos el trabajo, el aprendizaje, el envejecimiento, la interacción de grupos y la evolución humana. Con visión prospectiva, su reporte expresa:

Si tomamos hoy las decisiones correctas, con las inversiones necesarias, muchas de estas visiones pueden ser alcanzadas dentro de los próximos 20 años. Avanzando simultáneamente en varios de estos senderos, podríamos alcanzar una edad de innovación y prosperidad, una época que representaría un punto de cambio en la evolución de la sociedad humana. (Roco y Brainbridge, 2002)

Sobre la importancia de la nanotecnología, la decisión del Consejo de la Comunidad Europea del 19 de diciembre del 2006, en el VII Programa Marco de Acciones de Investigación, Desarrollo Tecnológico y Demostración (2007-2013) (CCE, 2006), reconoce que la competitividad de la industria del futuro dependerá en gran medida de las nanotecnologías y de sus aplicaciones. La investigación y desarrollo (I+D) en nanociencias y nanotecnologías y su incorporación en varios sectores podrán acelerar la transformación de la industria europea.

10.3. El sistema de la propiedad intelectual (PI)

La PI ha adquirido, en años recientes, un papel preponderante en la agenda económica internacional, transformándose en un tema particularmente conflictivo en las relaciones comerciales. En el plano internacional esto se evidencia en el debate de políticas entre países en estadios de desarrollo económico y de participación diferentes; por ejemplo, en los distintos instrumentos jurídicos multilaterales de la Organización Mundial de Comercio (OMC), o bilaterales o regionales, como los tratados de libre comercio (TLC), tratados bilaterales de comercio (TBI), tratados de promoción y protección de inversiones (TPPI) o tratados marco de comercio e inversión (TIFA).

La PI comprende —con criterio amplio— todos los temas vinculados con las creaciones del intelecto susceptibles de apropiación por los sujetos que les dieron origen. Se divide en dos grandes áreas: la propiedad industrial y los derechos de autor.

La propiedad industrial refiere a creaciones intelectuales aplicables específicamente al ámbito comercial e industrial (inventos y descubrimientos,

modelos de utilidad y diseños industriales, marcas de fábrica, nombre comercial, indicaciones de procedencia, protección contra competencia desleal, etcétera). Los derechos de autor se refieren a las obras artísticas, literarias y la investigación científica general.

Siguiendo a Roffe (2006a), en la nueva arquitectura internacional sobre propiedad intelectual es posible agrupar las distintas posiciones ideológicas al respecto en: a) los maximalistas, quienes defienden a ultranza los fundamentos clásicos de la propiedad intelectual y exigen una permanente profundización en esa línea; b) los minimalistas, cuyo énfasis está en preservar el dominio público y asegurar un libre acceso y distribución del conocimiento; c) aquellos que la condenan por considerar que se trata de un «colonialismo legislativo» bajo el eufemismo de *propiedad intelectual*, y d) quienes entienden a la propiedad intelectual como un derecho de doble alcance: derecho humano y derecho patrimonial.

El sistema de propiedad intelectual, tal cual está siendo implementado, lleva implícita la limitación del derecho de acceso a los beneficios del conocimiento, el aumento de la brecha tecnológica y la postergación de otros derechos humanos —a una vida digna, a la salud, ya que millones de personas no pueden acceder a los medicamentos por sus altos costos—, mediante patentes de compañías farmacéuticas transnacionales por plazos de 20 años (caso de medicamentos para combatir el VIH en África, América Latina y Asia).⁴⁸ La propiedad intelectual, y específicamente el derecho de las patentes, se transforma en uno de los «instrumentos legales» estratégicos y determinantes de las oportunidades a las cuales puedan acceder los países. Escribe Roffe:

La protección otorgada a autores, innovadores y creadores ha sido un terreno fértil de tensiones, especialmente en lo que se refiere al grado de protección que se les ofrece a cambio de su contribución al acervo tecnológico y cultural de una comunidad y al beneficio que percibe la sociedad en general, incluidos los futuros autores, innovadores y creadores. (Roffe, 2006a: 1)

La Subcomisión de Derechos Humanos de la ONU (resolución 2000/7 del 17/08/2000) afirma que la protección de los intereses morales y materiales

48 «Las cifras más recientes demuestran que el número de personas afectadas por el virus (33,2 millones en 2007) continúa aumentando en todas las regiones y la vasta mayoría vive en países en desarrollo. [...] La epidemia se propagó a todos los rincones del mundo, infectó a más de 50 millones de personas y cobró la vida de otros 20 millones. Si bien el acceso a tratamiento aumentó enormemente y ahora llega a cuatro millones de personas, más del doble que en 2006, muchos millones más todavía necesitan atención y la cobertura es muy desigual entre las naciones (fluctúa desde menos de 5 % hasta más de 90 %)». Banco Mundial, disponible en <http://go.worldbank.org/CGWPPCJ001> (última consulta: 14/12/2009).

que resultan de toda producción científica, literaria o artística de la que una persona es autora es un derecho humano en los límites del interés general (de conformidad con el párrafo 2 del artículo 27 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos y el artículo 15.1.c del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales). Declara, sin embargo, que dado que la aplicación del Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual que se Relacionan con el Comercio (ADPIC) no lo tiene en cuenta como debería, hay conflictos visibles entre el régimen relativo a los derechos de la propiedad intelectual contenido en el Acuerdo, por una parte, y el derecho internacional relativo a los derechos humanos, por otra.

En un artículo publicado por la CEPAL, Jacqueline Abarza y Jorge Katz, refiriéndose a «Los derechos de propiedad intelectual en el mundo de la OMC», dicen:

En síntesis, el cuadro internacional relativo a derechos de propiedad intelectual ha ido cambiando a través del tiempo. También lo ha hecho —gran presión internacional mediante— la legislación de patentes en los países de menor desarrollo relativo. Se otorgan derechos de propiedad intelectual no ya como incentivo a la actividad inventiva sino como condición sine qua non para «crear reputación» y atraer inversión extranjera directa aun cuando la evidencia empírica disponible sustentando la creencia de que existe correlación entre ambas no es muy concluyente. El mundo de la globalización es, sin duda, uno en el que la «nivelación del campo de juego» necesariamente reclama ir hacia una disciplina internacional compartida en materia de derechos de propiedad intelectual. Y sin embargo, lo que conviene a países desarrollados no necesariamente conviene a países de menor desarrollo relativo. (Abarza y Katz, 2002: 11)

Esas estructuras jurídicas fueron el resultado de fuertes negociaciones internacionales y de la presión de importantes *lobbies* de las empresas transnacionales entre 1986 y 1994 en la Ronda Uruguay del Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT). Continuaron en la OMC (1995), para ir plasmándose en los tratados ADPIC, más conocidos por la sigla inglesa TRIPs (Trade Related Intellectual Property Rights). Según aclaró en 1995 Edmund Pratt, directivo de la farmacéutica Pfizer:

Nuestras fuerzas combinadas nos permitieron establecer una red de gobiernos y sector privado que sentó las bases para lo que luego se convirtió en los ADPIC. (Citado en Rodríguez, 2003: 7)

El rol de los tratados comerciales como una herramienta jurídica de estrategia política con objetivos claros está descrito en el capítulo del Trade Promotion Authority (TPA):

Los acuerdos de libre Comercio maximizan las oportunidades para sectores críticos y básicos para la economía de EE. UU., como la tecnología ambiental y propiedad intelectual [...] el comercio creará nuevas oportunidades para que EE. UU. preserve su fortaleza sin contrapesos en asuntos económicos, políticos y militares. (U.S. Trade Act, 2002, división B, título XXI)

Los tratados comerciales multilaterales, regionales y binacionales, a la vez que establecen relaciones jurídicas que crean obligaciones y derechos internacionales, profundizan las asimetrías entre países desarrollados y en vías de desarrollo, y la propiedad intelectual, las licencias y la propiedad intangible, se incorporan dentro de la definición de «inversión» cubierta y protegida. Además, los países desarrollados imponen condicionalidades como la extensión a las patentes más allá de las normas ADPIC de la OMC, dentro de lo que se denominan los ADPIC- Plus o ADPIC Extra. Así, por ejemplo, uno de los mayores riesgos que se están observando es la patentación de la vida. Como lo expresa la socióloga Silvia Rodríguez Cervantes, experta en propiedad intelectual:

En la mesa de «negociaciones» por Tratados de Libre Comercio o Tratados Bilaterales de Inversión, está presente el tema de extender los derechos de propiedad intelectual ampliando casi «sin límites» lo que se puede patentar. [...] Desde la década del 90 encontramos antecedentes de negociaciones en las cuales Estados Unidos ha logrado incorporar en la legislación de países como Chile y algunos de Centro América, medidas respecto de la propiedad intelectual que antes ni siquiera se habían vislumbrado, la mayoría de ellas en materia de patentes de seres vivos. Cabe recordar que no es cierto que el TLC comporte desarrollo tecnológico para el país, y menos aún beneficios económicos derivados de la transacción de recursos por biotecnología. (Rodríguez, 2003: 7)

El artículo 27 del ADPIC, Anexo 1 C, en el numeral 3.b, establece la posibilidad de excluir la patentabilidad de las plantas y los animales *per se*,

[...]excepto los microorganismos, y los procedimientos esencialmente biológicos para la producción de plantas o animales, que no sean procedimientos no biológicos o microbiológicos. Sin embargo, los Miembros otorgarán protección a todas las obtenciones vegetales

mediante patentes, mediante un sistema eficaz sui generis o mediante una combinación de aquellas y este.

Basándose en este artículo, se ha argumentado que la excepción no incluye la modificación, patentabilidad y comercialización a nivel molecular, por lo que se está admitiendo que a esa escala la vida sería objeto de propiedad privada y de comercio. El caso 79-136, «Diamond, Comisionado de Patentes y Marcas v. Chakrabarty» (Corte Suprema de los Estados Unidos, 16 de junio de 1980), se transformó en el precedente judicial de las patentes de nanotecnología del siglo XXI. Fue el hito que no solo determinó la inclusión de la materia viva y de los principios biológicos de la vida en el sistema de patentes, sino que sus antecedentes pueden llegar a ser usados en litigios y polémicas ético-jurídicas frente a las nuevas patentes de nanotecnología, ya que significa que determinadas formas de vida son patentables.

Estas lecciones y discusiones serán seguramente reavivadas y tendrán a los derechos de propiedad intelectual (patentes) como el centro de los mayores conflictos legales. La nanotecnología generará un terreno de debates relacionados con el uso y el ejercicio de dichas patentes que incluirá aspectos éticos, sociales, económicos, políticos, legales y culturales, ante lo cual los ciudadanos de las naciones (del norte y del sur), lejos de estar preparados, se encuentran aún desinformados y ajenos a los intereses imperantes y a las estrategias sobre nanotecnología que abarcan esferas civiles y militares.

En un informe del ETC Group del 16 de junio del 2005 se planteaba

[...] veinticinco años después de que la industria biotecnológica obtuvo luz verde para el patentamiento de la vida, la nanotecnología codicia ahora los ladrillos de todo lo existente [...] Lecciones aprendidas del caso Diamond vs. Chakrabarty: A pesar de la exagerada publicidad que se hizo del microbio come-petróleo y de cómo se engulliría los derrames, el microorganismo patentado nunca funcionó [...] A diferencia de hace 25 años, las patentes relacionadas con nanotecnología no han requerido mayores cambios en la legislación. Como resultado, muchos gobiernos no se dan cuenta de la carrera que hay por obtener patentes. (ETC Group, 2005)

10.4. Cómo se fue adecuando el régimen de propiedad intelectual

Es importante repasar los cambios legislativos sustantivos en materia de propiedad intelectual en el medio norteamericano. En los Estados Unidos es especialmente significativa la trilogía legal, a partir de 1980, de los siguientes decretos: el Patent and Trademark Amendment Act, de 1980; el Federal Courts Improvement Act (FCIA), de 1982, y el Patent Restoration Act, de 1984.

El primero autoriza a instituciones públicas de investigación y desarrollo (especialmente universidades) a patentar los resultados de sus investigaciones y a explotarlos por vía de *joint-ventures* con firmas privadas, o a través de la creación de *start-ups* originados en grupos académicos e investigadores universitarios. [...] En segundo lugar [...] los cambios que se introducen, a partir de una regulación de 1982 de la Corte de Apelaciones del Circuito Federal (CAFC), en los requisitos para el otorgamiento de una patente de invención. En efecto, se reducen las exigencias de «nivel inventivo» requeridas para obtener una patente y gradualmente comienza a aceptarse la prueba de éxito comercial como justificación suficiente para otorgarla.

[...] Finalmente, un tercer hecho, [...] el Patent Restoration Act de 1984, que extiende la vida útil de las patentes farmacéuticas por un lapso de cinco años [más allá de los 20 años que ya tenían]. (Abarza y Katz, 2002)

Estas medidas tuvieron varias consecuencias directas: a) mayor número de patentes; b) su modelo fue impuesto a escala internacional principalmente por los grupos de poder (sector agrícola, industria farmacéutica, etcétera), y c) primero modificaron las estructuras jurídicas nacionales de Estados Unidos (y las empresas transnacionales), luego Estados Unidos llevó estas modificaciones a la Ronda Uruguay del GATT (1986-1994), después a la OMC (1995) y, finalmente, a partir de 1995, se plasmaron en los ADPIC.

Al llegar a la década de 1990 la legislación permitió expandir el modelo de las políticas implementadas desde el denominado Consenso de Washington y la metáfora de la *triple hélice*, por la que se promueve la interacción entre las universidades, el Estado y las empresas en una alianza productiva donde el rol del Estado, como *tercera parte*, consiste en regular el modo en que el mercado «interactuaría» con el sistema universitario en la satisfacción de sus demandas sectoriales.

Trasladadas e importadas a los países en desarrollo, estas políticas significaron «desapropiación de lo público, mercantilización del conocimiento

y subordinación Estatal a las demandas sectoriales», y se fueron evidenciando «casi en sintonía con planes estratégicos de ‘desarrollo’ que se sostienen a nivel global y local» (Svampa, 2008, en Antonelli, 2009: 96)

10.5. Cómo afectan los ADPIC a los países del Tercer Mundo

En las discusiones de los ADPIC los países de menor desarrollo fueron meros espectadores. A partir de ahí la brecha tecnológica ha aumentado progresivamente. Las promesas de mayor inversión extranjera, transferencia tecnológica que favorecería la innovación y la investigación nacional no se sustentan empíricamente, y los sistemas de propiedad intelectual de los ADPIC demuestran lo contrario (Kumar, 1996). Las corporaciones extendieron sus monopolios de mercado a un mayor número de países, excluyeron de manera más eficaz a los competidores locales y se convirtieron en los promotores de una legislación uniforme de alta protección acorde a sus intereses.

Si observamos lo que ocurrió en la década de 1990, vemos cómo en la mayor parte de los países de América Latina se descontinuaron los proyectos de I+D nacional; una manera fue la adquisición de empresas nacionales por corporaciones multinacionales (contabilizadas como inversión extranjera), que significó el traslado de la investigación más sofisticada a sus casas matrices.

Dentro de dicho cuadro varios de los países de menor desarrollo relativo se han visto presionados para modificar su legislación de patentes [...] Es importante observar a esta altura de nuestra argumentación que ello no necesariamente va en su beneficio, en la medida en que muchas veces una patente extranjera acaba bloqueando esfuerzos domésticos de aprendizaje tecnológico e impidiendo un eventual proceso de «catching-up» con el «estado del arte» internacional, o abriendo el camino para que firmas extranjeras logren captar posiciones dominantes de mercado adquiriendo control, por ejemplo, sobre el patrimonio genético de países menos desarrollados. Esto hace que la discusión de pros y contras del ADPIC sea cada vez más urgente en los países de la periferia. (Abarza y Katz, 2002: 11-12)

Es sugestivo cómo las presiones del norte crean y transforman leyes en el sur, acorde a los intereses de los países desarrollados, con protecciones contraproducentes para los intereses de los países en desarrollo.

El ADPIC fue percibido por muchos como un mal necesario para la obtención de beneficios comerciales en sectores de mayor interés,

tales como textiles, agricultura y la consolidación de un sistema multilateral que desterraría las acciones unilaterales del pasado [...] Los países de América Latina y el Caribe iniciaron una revisión radical y una adecuación de sus regímenes nacionales. Una manifestación de ello ha sido la información proporcionada al Consejo de los ADPIC de la existencia de más de mil leyes y reglamentos relativos o aplicables a la propiedad intelectual. Más del 50 % de las leyes y reglamentos principales han sido promulgados después de la vigencia del Acuerdo de los ADPIC, es decir, después del 1 de enero de 1995. (Roffe, 2006b: 5)

La adecuación de las legislaciones nacionales sobre propiedad intelectual en el MERCOSUR se manifiesta, por ejemplo, en la Ley argentina de Propiedad Intelectual (1995); el Código brasileiro de la Propiedad Intelectual (1996); el Protocolo de Armonización de Normas sobre Propiedad Intelectual en el MERCOSUR en materia de Marcas, Indicaciones de Procedencia y Denominaciones de Origen (aprobado por decisión 8/95 del Consejo del Mercado Común); la Ley uruguaya sobre Marcas y Denominaciones de Origen (n.o 17 011, de 1998); la Ley uruguaya de Propiedad Intelectual (n.o 17 164, del 2000); la ley uruguaya que modifica la ley n.o 9739, de 1937 (n.o 17 616, del 2003), así como la Ley uruguaya sobre Derechos de Autor, Propiedad Literaria y Artística (n.o 18 036, del 2006).⁴⁹ Todas ellas tienen como finalidad cumplir con los requerimientos de la OMC.

Uruguay suscribió el acuerdo ADPIC por medio de la ley n.o 16 671, del 13 de diciembre de 1994. También ratificó las disposiciones del Protocolo de Normas sobre Propiedad Intelectual en el MERCOSUR en Materia de Marcas, Indicaciones de Procedencia y Denominaciones de Origen.

El informe n.o 2/2006 de la Comisión Sectorial para el MERCOSUR, Uruguay (COMISEC), advierte sobre la inconveniencia de los sucesivos cambios de la legislación sobre propiedad intelectual, primero para adaptarse a las reglas de la OMC sobre los ADPIC y ahora para otorgar beneficios *plus* y *extra*. Para los técnicos uruguayos las reglas de los ADPIC (OMC) constituyen un *techo*, no un *piso*, por lo cual no aconsejan la firma de TLC, TIFA u otros tratados que aumenten la protección sobre propiedad intelectual, ya que estos atentan contra los intereses nacionales de Uruguay y también impactan en el MERCOSUR.

49 Publicada en el *Diario Oficial* n.o 27109, 31/10/2006. Tratado de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual: «Artículo Único. Apruébese el Tratado de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) sobre Derecho de Autor y Declaraciones Concertadas relativas al Tratado de la OMPI sobre Derecho de Autor, suscripto en la ciudad de Ginebra, el 8 de enero de 1997».

Contrariamente a lo que aconseja el informe, Uruguay firmó con los Estados Unidos de América un Tratado de Promoción y Protección de Inversiones Recíprocas (TPPI),⁵⁰ vigente desde el 1 de noviembre del 2006, y un Acuerdo Marco de Comercio e Inversiones (TIFA),⁵¹ el 25 de enero del 2007. En estos se incluyen las normas ADPIC Plus (aquellas que elevan los estándares previstos en el ADPIC) y ADPIC Extra (las referidas a la regulación de aspectos no contemplados en el ADPIC) sobre propiedad intelectual y la protección de las nuevas tecnologías. Luego de ratificado el TPPI y antes de ratificarse el TIFA, Uruguay y Estados Unidos de América han celebrado acuerdos sobre cooperación científica y tecnológica⁵² que incluyen propiedad intelectual (anexo I), recursos genéticos (artículo VII.3), obligaciones en materia de seguridad, protección de tecnología sensible (información clasificada, anexo II.I), información comercial confidencial (anexo I.IV), transferencia de tecnología (anexo II.II), etcétera.

En un trabajo anterior (Chiancone y otros, 2008) planteábamos que, al estar el Plan Estratégico Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación (PENCTI) en fase de elaboración, veíamos la posibilidad y la pertinencia de incluir de manera destacada una visión socialmente responsable de Ciencia y Tecnología (C+T), adoptando posturas más avanzadas como la inclusión de análisis de los aspectos éticos, legales y sociales. Si bien aún se sigue trabajando con las bases para dicho Plan, hasta el momento no se ha incluido una postura fuerte en el sentido planteado.

10.6. Conclusiones

En la era de la información y del conocimiento, con patentes que monopolizan su acceso, con magros recursos económicos para invertir en I+D y con la *fuga de cerebros* cooptados por más atractivas propuestas, los países del sur ven amenazadas sus posibilidades de aprovechar los avances científico-tecnológicos. El paradigma emergente, con la nanotecnología en la base de la plataforma de convergencia, puede ser una oportunidad para países como Uruguay. Implicará, entre otras cosas, un marco de propiedad intelectual que favorezca nuestros desarrollos en innovación y tecnología, y no que sea impuesto en relaciones asimétricas.

50 Ley nº 17943, disponible en página del Parlamento nacional: <http://www.parlamento.gub.uy/leyes/ AccesoTextoLey.asp?Ley=17943&Anchor> (última consulta: 14/12/2009).

51 Ley 18432, publicada en el *Diario Oficial* n.º 27643, 30/12/2008. Estados Unidos - Uruguay, Acuerdo Marco Sobre Comercio e Inversión, texto disponible en la página Parlamento nacional: <http://www.parlamento.gub.uy/leyes/ AccesoTextoLey.asp?Ley=18432&Anchor> (última consulta: 14/12/2009).

52 Firmado en Washington D. C. el 29 de abril de 2008.

La trilogía de las leyes estadounidenses, llevadas a nivel del GATT y desde allí a los ADPIC de la OMC, ahora se extiende a los ADPIC Plus y ADPIC Extra de los tratados BIT modelo 2004 de Estados Unidos y los que están firmando la Unión Europea, la Asociación Europea de Libre Comercio (EFTA por su sigla en inglés), Japón y China. En este escenario jurídico se sientan las bases para las nanotecnologías y las ciencias del siglo XXI.

Revisar las desigualdades creadas por las patentes y los demás derechos de propiedad intelectual que obstaculizan y determinan una especie de síndrome de subdesarrollo perpetuo es una tarea pendiente.

El acceso a la información, al conocimiento y a los beneficios derivados de la investigación son derechos humanos y requieren una consideración de acuerdo al estatus legítimo de normas imperativas de derecho internacional —*ius cogens*— que tienen.

Bibliografía

ABARZA, J., y J. KATZ (2002). *Los derechos de propiedad intelectual en el mundo de la OMC*. Santiago de Chile: Naciones Unidas, CEPAL, Serie 118.

ANTONELLI, M. (2009). «Minería transnacional y dispositivos de intervención en la cultura. La gestión del paradigma hegemónico de la 'minería responsable' y el desarrollo sustentable», en *Minería transnacional, narrativas del desarrollo y resistencias sociales*. Buenos Aires: Biblos.

AROCENA, R., y J. SUTZ (2003). *Subdesarrollo e innovación. Navegando contra el viento*. Madrid: Cambridge University Press.

CARRILLO, J. (2005). «¿Qué es la Economía del Conocimiento?», *Transferencia*, n.º 69, http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferencia/Transferencia69/Notas_Generales_69/Nota1_69.htm (última consulta:14/12/2009).

CCE (CONSEJO DE LA COMUNIDAD EUROPEA) (2006), del 19 de diciembre, en el VII Programa Marco de acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración (2007-2013), http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/i23022_es.htm (última consulta:14/12/2009).

CHIANCONE, A., R. CHIMURIS y L. GARRIDO (2008). «La nanotecnología en Uruguay», en G. Foladori y N. Invernizzi, *Nanotecnologías en América Latina*. México: Porrúa.

COMISEC (COMISIÓN SECTORIAL) (2006). *Aspectos de la inserción internacional del Uruguay. Análisis y reflexiones*. Montevideo: Oficina de Planeamiento y Presupuesto, http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/674/1/125_-INFORME_FINAL_INSERCION_MERCOSUR_EEUU_-_1_06_06.pdf (última consulta:14/12/2009).

ETC Group (2005). «Las patentes de nanotecnología: más allá de la naturaleza. Implicaciones para el Sur global». *Boletín de Prensa*, 16 de junio, <http://www.etcgroup.org/en/node/52> (última consulta:14/12/2009).

FOLADORI, G., y N. INVERNIZZI (2006) «La Nanotecnología, objetivación de la naturaleza y el futuro del trabajo humano», en G. Foladori y N. Invernizzi (comps.), *Nanotecnologías en América Latina*. México: Porrúa.

JAFFE, A., y J. LERNER (2004). *Innovation and its discontents: How our broken Patent System is endangering innovation and progress, and what to do about it*. Princeton: Princeton University Press.

KUMAR, N. (1996). *Foreign Direct Investment and Technology Transfer in Development: a perspective on recent literature*. United Nations University, Institute for New Technologies, <http://www.intech.unu.edu/publications/discussion-papers/9606.pdf> (última consulta:14/12/2009).

OMC (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DEL COMERCIO) (1995). Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual Relacionados con el Comercio, ADPIC, <http://www.jurisint.org/pub/06/sp/doc/26.htm> (última consulta:14/12/2009).

PÉREZ, C. (2001). «Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil». *Revista de la CEPAL*, n.o 75, <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/3/19323/perez.pdf> (última consulta:14/12/2009).

PITTALUGA, L., V. LANZILOTA y C. LLAMBÍ (2005). *Uruguay: Hacia una estrategia de desarrollo basada en el conocimiento. Informe sobre Desarrollo Humano en Uruguay 2005*, Montevideo: PNUD.

PRATT Jr., E. (1995). «Intellectual Property Rights and International, Trade Pfizer Forum». *The Economist*, 27 de mayo.

ROCO, M. C., y W. S. BRAINBRIDGE (2002). «Executive Summary», en *Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Virginia: National Science Foundation.

RODRÍGUEZ, S. (2003). «De Río a Cancún: Los derechos de los pueblos no son negociables», *Global Issue Papers*, n.o 2. Berlín: Fundación Heinrich Boll, agosto, <http://www.boell.de> (última consulta:14/12/2009).

ROFFE, P. (2006). «América Latina y la nueva arquitectura internacional de la propiedad intelectual: De los ADPIC- TRIPS a los nuevos tratados de libre comercio», en UNCTAD-ICTSD. *Diálogo regional sobre propiedad intelectual, innovación y desarrollo sostenible*, Costa Rica, 10-12 de mayo, http://www.ciu.com.uy/innovaportal/file/674/1/145_roffe.pdf (última consulta:14/12/2009).

TANIGUCHI, N. (1974). *On the Basic Concept of «Nano Technology»*. Tokio: International Conference on Production Engineering.

U.S. TRADE PROMOTION AUTHORITY (2002). Trade Act. División B, título XXI. Promulgado por el presidente George W. Bush.

Capítulo 11

Nanotecnologías para el desarrollo en América Latina

Guillermo Foladori⁵³

11.1. Introducción

Las nanotecnologías (NT) se están desarrollando en todo el mundo.⁵⁴ En América Latina, Brasil es, posiblemente, el país donde hay mayor investigación, seguido de México y Argentina, pero muchos otros países tienen centros de investigación activos en NT (Foladori e Invernizzi, 2008).

¿Pueden las NT convertirse en un instrumento que impulse el desarrollo de los países? Esta no es una pregunta trivial, ya que el desarrollo tecnológico por sí mismo puede inducir al crecimiento económico, pero no necesariamente es garantía de desarrollo, si entendemos este término como reducción de la inequidad y la pobreza, y aumento del nivel de vida de la población.

Para responder a dicha pregunta analizamos los diferentes discursos sobre el papel de las NT en el desarrollo y, también, las políticas públicas de Ciencia y Tecnología (C+T) en América Latina que se refieren al tema. La conclusión a la que llegamos es que la manera en que se están desarrollando las NT en América Latina se orienta a profundizar la trayectoria tecnológica comandada por el mercado y está lejos de enfocarse a la satisfacción de las necesidades sociales más imperiosas. Asimismo, señalamos un camino para pensar una política alternativa que permita corregir esta situación.

53 Profesor del Doctorado en Estudios del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Miembro de la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (ReLANS). Correo electrónico: gfoladori@gmail.com.

54 Las NT son una serie de tecnologías que permiten manipular la materia a escala de hasta 100 nanómetros aproximadamente, con la consecuencia de que en dicho rango de tamaño la materia tiene propiedades físicas y químicas diferentes a las conocidas en la misma materia en tamaño mayor.

11.2. Tres concepciones no contradictorias, y en algunos casos complementarias, que caracterizan las políticas y propuestas para nanotecnología

Las políticas nacionales de C+T, así como las propuestas académicas y otras de diversas organizaciones e instituciones, consideran que las NT pueden ofrecer: a) un camino para incrementar la competitividad internacional; b) tecnologías eficientes y baratas en áreas clave para la satisfacción de necesidades sociales, como el agua potable, la energía o la medicina, y c) un camino para el desarrollo si se cuenta con apoyo financiero y un marco regulatorio adecuado que garantice la distribución equitativa de los beneficios. Estas tres concepciones no necesariamente son contradictorias; por el contrario, algunas veces son complementarias.

La National Nanotechnology Initiative de los Estados Unidos, por ejemplo, justifica la asignación de fondos federales para la investigación de las NT en la necesidad de mantener la competitividad internacional:

Federal support of the nanotechnology is necessary to enable the United States to take advantage of this strategic technology and remain competitive in the global marketplace well into the future. (NS&TC, 2000: 21)

El Grupo de Trabajo en Nanociencias y Nanotecnología del Brasil, que elaboró el documento inicial de apoyo público a la investigación en las NT, también justifica el impulso público a las NT por la competitividad:

O objetivo do Programa é criar e desenvolver novos produtos e processos em Nanotecnologia, implementando-os para aumentar a competitividade da indústria nacional e capacitando pessoal para o aproveitamento das oportunidades econômicas, tecnológicas e científicas da Nanotecnologia. (GT Nanotecnología, 2003: 8)

La misma opinión está presente en el decreto que creó la Fundación Argentina de Nanotecnología en el 2005:

[...] un programa para incentivar, sentar las bases y promover el desarrollo de infraestructura humana y técnica en la REPÚBLICA ARGENTINA para que, a través de actividades propias y asociadas, se alcancen condiciones que permitan competir internacionalmente en la aplicación y desarrollo de micro y nanotecnologías que aumenten el valor agregado de productos destinados al consumo interno y la exportación.

Que la producción y exportación de productos de alta densidad tecnológica por parte de nuestro país redundará, asimismo, en la

consecuente creación de puestos de trabajo. (Decreto presidencial 380/2005)

En México, donde hasta 2009 no existe un programa nacional de desarrollo de las NT, el interés gubernamental se ha manifestado en los planes de C+T. Así, en el Programa Especial de Ciencia y Tecnología 2001-2006, las NT aparecen como estratégicas. Y unos años después, en el Programa Especial de Ciencia y Tecnología 2008-2012, se justifica su importancia, junto con otras áreas, de la siguiente manera:

El sector ciencia y tecnología, establece como factores fundamentales del desarrollo en esta materia la educación de calidad y el fortalecimiento de ciencia básica y aplicada, el desarrollo tecnológico y la innovación para contribuir a mejorar el nivel de vida de la sociedad y lograr una mayor competitividad. (CONACYT, 2008: 25)

A diferencia de los casos anteriores, los documentos mexicanos son explícitos en su intención de apoyar la mejora en el nivel de vida, aunque el tema de la competitividad es siempre recurrente. En un documento que anuncia la creación de la Red de Nanociencia y Nanotecnología se justifica de la siguiente manera:

La investigación en Nanotecnología puede aportar a nuestro país la innovación tan necesaria para generar empresas de alta tecnología que incrementen la competitividad del país y produzcan empleos bien remunerados. (CONACYT, s/f)

Los ejemplos anteriores son ilustrativos de un razonamiento mecánico, según el cual el aumento de la competitividad garantizaría una mejora en las condiciones de vida. Esto, sin embargo, está lejos de ser así. Por el contrario, pueden señalarse numerosos casos en los que el aumento de la competitividad internacional va de la mano con un aumento en la inequidad en la distribución de la riqueza, como ocurrió en México entre 1985 y 1995 (Delgado Wise e Invernizzi, 2002).

En un segundo nivel de aproximación a la satisfacción de las necesidades está el planteamiento que sugiere la necesidad de encaminar la investigación y desarrollo (I+D) de las NT hacia sectores estratégicos que tengan capacidad de satisfacer necesidades inmediatas. Así, el Task Force on Science and Technology and Innovation del United Nations Millennium Project sugiere que el desarrollo de las NT debe orientarse hacia sectores estratégicos como agua potable, medicina y energía.

The use of nanotechnology applications for water treatment and remediation; energy storage, production, and conversion; disease diagnosis and screening; drug delivery systems; health monitoring; air pollution and remediation; food processing and storage; vector and pest detection and control; and agricultural productivity enhancement will help developing countries meet five of the Goals. [Millennium Development Goals]. (Juma y Yee-Cheong, 2005: 70)

En el mismo sentido, el editorial «Tackling global poverty», escrito por el Council of Science Editors para el segundo número de *Nature Nanotechnology* (2007/2: 661), considera que el desarrollo de las NT en áreas específicas como agua y medicina implicará un alivio significativo para la vida de los pobres.

Este segundo nivel de aproximación propone conectar más directamente las tecnologías con el producto final y con los consumidores. Sin embargo, en la sociedad capitalista existe una doble metamorfosis que impide que los productos satisfagan directamente las necesidades para las cuales fueron creados. La primera es que estos productos deben llegar al mercado, lo cual significa que sus precios deben compensar los costos de producción y todavía ofrecer una ganancia al empresario. Cuando existen inversiones alternativas que dan mayores ganancias, la producción se orienta a estos últimos sectores. Las enfermedades de los pobres (*neglected diseases*) son un ejemplo muy elocuente de importantes áreas de investigación marginadas por razones de mercado (Trouiller y otros, 2001; Zumla, 2002). La segunda metamorfosis se refiere a que los consumidores deben poseer capacidad de compra para adquirir las mercancías. Una vez más, este no es el caso de los millones de pobres del mundo. Debido a estas dos metamorfosis, en una economía de mercado, una propuesta de desarrollo tecnológico que se limite a sugerir o subsidiar tímidamente la producción de productos estratégicos que satisfagan necesidades inmediatas no es más que una declaración de buenas intenciones.

La tercera propuesta de desarrollo de las NT reconoce que la competitividad y la orientación hacia sectores estratégicos son decisiones importantes pero no suficientes. Reclama una agenda de desarrollo de las NT con fondos de financiamiento y colaboración internacional en I+D, sobre todo con relación a los países en vías de desarrollo. Importante repercusión pública tuvo la propuesta del entonces grupo de trabajo en nanotecnología del Centro de Bioética de la Universidad de Toronto (Salamanca-Buentello y otros, 2005). Este grupo identificó cinco de los ocho Objetivos del Milenio para el Desarrollo que podían beneficiarse de la revolución de las NT y propuso un camino para obtener apoyo financiero.

To expand on this idea, we propose an initiative, called «Addressing Global Challenges Using Nanotechnology,» to accelerate the use of nanotechnology to address critical sustainable development challenges. (Salamanca Buentello y otros, 2005: 0101)

El Meridian Institute sugiere que esta posibilidad ya está siendo lograda por algunos gobiernos, mediante sus programas asistenciales de desarrollo.

Few governments have effectively connected their nanotechnology programs with their official development assistance (ODA) programs. Given the stated commitment by many aid-giving governments to helping achieve the Millennium Development Goals, a reasonable proportion of their ODA should surely go toward developing and transferring technologies that could be of help. (Meridian Institute, 2005: 12)

Esta propuesta resulta un paso más avanzado que la confianza en la competitividad y, también, que la orientación hacia sectores que satisfagan necesidades inmediatas. Es, sin embargo, limitada, al no reconocer cuáles son las fuerzas sociales que reproducen diariamente la inequidad y la pobreza y tampoco identificar las fuerzas sociales que pueden presionar para una agenda de NT orientada a la solución de problemas estructurales del desarrollo.

A pesar de las importantes diferencias entre las tres posiciones antes mencionadas, todas ellas tienen en común el enfocar los problemas del desarrollo como una cuestión técnica, cuando el desarrollo es una cuestión socioeconómica. Representan un enfoque técnico porque conceptualizan al desarrollo como la obtención de más cosas, mejores cosas o cosas mejor distribuidas; una relación técnica entre las personas y las cosas. En ningún momento la implementación de estas posiciones lleva a alterar las fuerzas del mercado que presionan por la inequidad y la pobreza; por el contrario, depositan en el mercado la confianza para superar la inequidad. Esta confianza es infundada, si prestamos atención a lo que ha ocurrido en la última década de desarrollo de las NT. En lo que respecta a la competitividad, esta solo puede ser obtenida a expensas de que otros países pierdan posiciones relativas, manteniéndose la desigualdad a escala global. La segunda perspectiva reconoce, de alguna manera, que la competitividad no es suficiente, y promueve el desarrollo de la NT en aquellos sectores donde las necesidades sociales son más apremiantes; pero también es una propuesta técnica porque no examina las múltiples barreras que las relaciones de mercado imponen al capital para invertir en tales sectores. El tercer enfoque entiende que es necesario un paquete de financiamiento para implementar las NT en función de satisfacer las necesidades de los sectores más pobres, pero aun así es

una propuesta técnica en la medida en que no considera las fuerzas sociales que pueden apoyar tal tipo de iniciativa, ni tampoco cómo dichas iniciativas pueden ser tergiversadas por las fuerzas del mercado.

11.3. ¿Qué han mostrado las nanotecnologías en su primera década de desarrollo?

En primer lugar, las NT han mostrado un rápido proceso de concentración de la I+D en países ricos. Según la consultora Científica, especializada en NT, los ocho primeros jugadores en nanotecnología, según las inversiones públicas para I+D en el 2008, son la Unión Europea (si se la toma como unidad de 25 países), Rusia, China, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, India y Taiwán. Los únicos países en desarrollo en esta lista son China e India, ambos con enormes PIB (Científica, 2008: 36). Las NT demandan altos volúmenes de capital, lo que favorece la concentración de la I+D en los países más desarrollados.

Otro indicador de la concentración de la riqueza en NT es el monopolio sobre las patentes. Según datos recopilados por la OEI de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual en el 2009, entre 2000 y 2007 cerca del 42 % de las patentes estaba en manos de 10 grandes corporaciones —como la Bayer, Philips y 3M— y algunas universidades estadounidenses de gran poder económico —como la Universidad de California y el Massachussets Institute of Technology— (OEI, 2009). En términos de países poseedores de las patentes la concentración es aún más clara, con Estados Unidos en posesión de más del 60 %.

La concentración de la materia prima nanotecnológica es un indicador adicional de esta concentración. Según el registro no exhaustivo de Nanowerk, casi el 50 % de las empresas que suministran materias primas nanotecnológicas están localizadas en Estados Unidos (146 en un total de 305 el 3 de marzo del 2009) (Nanowerk-Database, s/f).

Esta tendencia a la concentración, que es intrínseca a la economía de mercado, no augura muchas posibilidades para los países en desarrollo.

En segundo lugar, las NT se han desarrollado prioritariamente hacia la producción de artículos suntuarios. El centro de investigaciones Woodrow Wilson Internacional Center for Scholars, con sede en Washington D. C., divulga los resultados de una investigación que se viene llevando a cabo desde el 2005 para identificar los productos con nanocomponentes que ya están en el mercado (más de mil en el 2009). Este inventario indica el grado de avance de las NT para satisfacer las necesidades del consumidor. Los resultados muestran que la aplastante mayoría de los productos son suntuarios (WWICS,

2009; Foladori e Invernizzi, 2006). Como es lógico, las tendencias del mercado llevan a privilegiar sectores con alto poder adquisitivo, muy lejos de satisfacer necesidades para combatir la inequidad y la pobreza.

En tercer lugar, la primera década de desarrollo de las NT ha mostrado que la advertencia sobre los potenciales riesgos a la salud y el medio ambiente, así como los impactos en el trabajo, no provinieron de las empresas que investigan y producen nanopartículas y nanoestructuras, ni tampoco de los gobiernos que impulsan la I+D con fondos públicos, sino de organizaciones no gubernamentales (ONG) y de sindicatos y asociaciones de sindicatos (Foladori, 2009). Consecuentemente, la incorporación de los temas de regulación en las agendas públicas en Europa y los Estados Unidos es muy reciente, y posterior a declaraciones de coaliciones internacionales que agrupan a decenas de ONG, sindicatos y uniones de sindicatos (ETC Group, 2003; ACTU, 2005; FoE-Australia, 2006; IUF-UITA, 2006-7; ICTA, 2007; ETUC, 2008). Esta referencia cronológica ilustra sobre cuáles son las fuerzas sociales que deben incluirse en las discusiones de política de nanotecnología para evitar el impacto de la desigual distribución de riesgos e implicaciones para el trabajo.

11.4. ¿Qué debe contemplar un enfoque social para el desarrollo de las NT?

En América Latina casi todos los fondos para I+D de NT son públicos (Invernizzi, 2008, para Brasil; Andrini y Figueroa, 2008, para Argentina; Foladori y Fuentes, 2008, para Chile). En algunos países, como es el caso de Brasil, Argentina y Chile, hay fondos dirigidos explícitamente a las NT. En otros, como México, los investigadores de NT deben competir en concursos junto con otras áreas o temas de investigación.⁵⁵ Pero la norma que prima es que el financiamiento sea de corto plazo y privilegie los centros de excelencia.⁵⁶ Normalmente se trata de fondos para concursos de uno a tres años (Foladori e Invernizzi, 2008). La idea que está por detrás de esta propuesta es que el gobierno dé un primer estímulo y las empresas privadas se encarguen, a partir de allí, de invertir en I+D de NT de más largo plazo y de incorporar los conocimientos a los procesos productivos para llegar con

55 A partir de 2010 hay un fondo específico para NT en México.

56 El caso brasileño es interesante porque existen propuestas específicas para el desarrollo de zonas geográficas deprimidas (nordeste) y programas para encadenar la investigación con la empresa. También en México y en Chile hay estos programas, y, en el caso de Uruguay, el Polo Tecnológico Pando implica una explícita relación entre la universidad pública y el sector empresarial (Chiancone y otros, 2008). Sin embargo, cuando no hay una política de financiamiento público de largo plazo encadenado a los procesos productivos y al consumidor, terminan imponiéndose los intereses de la empresa privada, guiada por el mercado y lejos del interés por la satisfacción de las necesidades de las mayorías pobres.

productos al mercado. Sin embargo, con las NT no se está en un mercado conocido, donde existen cadenas de producción articuladas y mecanismos de acceso a créditos y al mercado en funcionamiento. Se trata de productos nuevos, muchas veces disruptivos —en el sentido de que cumplen múltiples funciones y no son exactamente iguales a los que venían existiendo en el mercado—. Se trata, también, de productos que deben crear nuevas cadenas, desde la compra de la materia prima hasta los procesos de incorporación de las nanopartículas o nanoestructuras a los productos finales existentes. No hay experiencia histórica de mercado en esto, lo cual hace muy difícil que las empresas privadas inviertan en I+D y en la producción en estas condiciones de incerteza.

Existen, además, problemas ligados a la actitud que los consumidores pueden tener respecto de productos desconocidos. Hay un gran debate internacional sobre los potenciales efectos tóxicos para la salud y el medioambiente de los productos de las NT. Sin embargo, las instituciones públicas encargadas de impulsar las NT en América Latina, en lugar de tomar la delantera fomentando la I+D también en las áreas de toxicidad y de medioambiente, pretenden ocultar los posibles efectos negativos en aras de no interponer trabas en el mercado y la competitividad. Esto es claro cuando se analiza la orientación de los fondos para NT, en los cuales no hay prácticamente nada destinado a riesgos (Foladori, 2012; Invernizzi, 2008, para Brasil). De manera que el salto final del producto al consumidor está montado sobre arenas movedizas, algo que la empresa privada tampoco es proclive a asumir.

Sostenemos que el impulso a tecnologías disruptivas como son las NT debe contemplar tres niveles, de manera encadenada y con financiamientos de largo alcance: la I+D, la producción de productos con nanocomponentes y el acceso a dichos productos por los consumidores.

Los fondos para I+D en América Latina ya son públicos; sin embargo, no hay una política de financiamiento de largo alcance para áreas estratégicas orientada a combatir la pobreza y reducir la desigualdad.⁵⁷ Ni siquiera hay, en muchos países, un diagnóstico serio de cuáles son las áreas estratégicas en las cuales se cuenta con infraestructura y conocimientos científico-técnicos de investigación, de producción y mecanismos para llegar al consumidor. Esto hace que muy posiblemente la orientación termine siendo la que el mercado determina, y las alianzas y convenios con empresas multinacionales y con

57 En algunos países existen documentos oficiales sobre las áreas estratégicas a desarrollar, pero en muchos de ellos se trata de áreas estratégicas con el fin de incrementar la competitividad internacional.

institutos de investigación de países desarrollados profundizarán la I+D hacia donde el mercado mundial apunta, no hacia la satisfacción de las necesidades endógenas de los países.

El segundo nivel lo constituye la producción de productos con nanocomponentes. Los países de América Latina tienen —aunque cada vez menos desde las privatizaciones de los años 80 y 90— sectores públicos de producción material y de servicios, muchas veces en las áreas de agua potable, energía, salud y transportes. Bien se podría utilizar las empresas públicas para integrar a la I+D e impulsar la producción orientada de NT a la satisfacción de las necesidades prioritarias. También estos sectores cuentan con mecanismos para hacer llegar al consumidor (tercer nivel) los productos finales sin necesidad de pasar por el mercado, o pasando de manera subsidiada. Un proyecto de esta naturaleza integraría orgánicamente la I+D con la producción y con el consumo.

Pero aun llevando a cabo un proyecto de esta forma falta considerar cuáles son los sectores sociales que impulsarían una propuesta de tal tipo. La experiencia mundial de una década de desarrollo de las NT y la forma como se han venido desarrollando en América Latina da a entender que ni el sector empresarial ni el sector público han manifestado interés en tal sentido. Una propuesta de este tipo debe contemplar la participación de sindicatos y ONG interesadas en mejorar las condiciones de vida de la población en general y garantizar a trabajadores y consumidores que el análisis de riesgo será previo a la producción y comercialización de los productos.

11.5. Conclusiones

La sociedad está atravesando un experimento tecnológico de escala mundial: la revolución de las NT. Estas prometen modificar los procesos de investigación, productivos y la vida cotidiana de forma radical. Tanto los países desarrollados como muchos en vías de desarrollo están invirtiendo dinero público en I+D en NT. En América Latina lo están haciendo, en diversas escalas, Brasil, México, Argentina, Chile, Colombia y varios otros.

Pero el proceso mediante el cual las instituciones públicas de América Latina apoyan el desarrollo de las NT no es satisfactorio. Por lo regular, las políticas de ciencia, tecnología e innovación ofrecen un mínimo financiamiento de corta duración para la I+D y esperan que el sector privado haga el resto, o sea, continúe las investigaciones, produzca y llegue al consumidor. Sin embargo, los bajos niveles de innovación son característicos de la región, y la situación se vuelve más compleja cuando se trata de tecnologías disruptivas,

pues no hay experiencia de cadenas productivas establecidas, ni de líneas de financiamiento particulares, ni de mercados establecidos. Esto hace que, probablemente, la I+D en NT en América Latina se oriente a satisfacer los intereses de las alianzas académicas y científicas con instituciones externas a la región, o con corporaciones multinacionales.

Alternativamente, la mayoría de los países de América Latina aún cuenta con sectores productivos en manos del Estado, que bien podrían integrarse al desarrollo de las NT. Cuentan, además con la posibilidad de llegar directamente a los sectores necesitados, en especial en áreas donde el sector público es monopólico o tiene gran peso, como el agua potable, la energía, los transportes y la salud. Para que esto ocurra, las fuerzas sociales preocupadas por ampliar los beneficios sociales de las NT, así como dirigirlas hacia la reducción de la pobreza y la inequidad y asegurar su desarrollo responsable, deben fortalecer su papel reivindicatorio de políticas de I+D con tales fines. En varios países industrializados, y también en América Latina, algunos sindicatos y ONG ya se han manifestado en este sentido. El camino existe, falta transitarlo.

Bibliografía

ANDRINI, L., y S. FIGUEROA (2008). «El impulso gubernamental a las nanociencias y nanotecnologías en Argentina», en G. FOLADORI y N. INVERNIZZI (comps.), *Nanotecnologías en América Latina*. México: Porrúa.

AUSTRALIAN COUNCIL OF TRADE UNIONS (ACTU) (2005). «Submission to a senate inquiry into workplace exposure to toxic dust, including silica dust and nanoparticles», en A. SALLEH. «Unions say nano-loopholes may hurt workers», *ABC Science on line*, <http://www.abc.net.au/cgi-bin/common/printfriendly.pl?science/news/stories/s1451929.htm> (última consulta:28/7/2008).

CHIANCONE, A.; CHIMURIS, R.; y GARRIDO, L. (2008). «La nanotecnología en el Uruguay», en G. FOLADORI y N. INVERNIZZI (comps.), *Nanotecnologías en América Latina*. México: Porrúa.

Científica (2008). *The Nanotechnology Opportunity Report*. 3.a ed.

CONACYT (CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA) (2008). Programa Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación 2008-2012. México: CONACYT. <http://www.siiicyt.gob.mx/siiicyt/docs/contenido/PECiTI.pdf> (última consulta:31/10/2009).

— Red Temática de Nanociencias y Nanotecnología. Dirección de Redes. DAIC. México: CONACYT, <http://www.conacyt.mx/Redes/Redes-Tematicas/Red-Nanociencias-y-Nanotecnologia.pdf> (última consulta:10/2/2010).

DELGADO WISE, R., y N. INVERNIZZI (2002). «México y Corea del Sur: claroscuros del crecimiento exportador en el contexto del globalismo neoliberal», *Aportes, Revista Mexicana de Estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, vol. II, n.o 2-4, pp. 63-86.

ETC GROUP (2003). «The Big Down: Atomtech - Technologies Converging at the Nano-scale», <http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=375> (última consulta:27/7/2006).

ETUC (EUROPEAN TRADE UNIONS COUNCIL) (2008). «ETUC resolution on nanotechnology and nanomateriales». http://www.etuc.org/IMG/pdf_ETUC_resolution_on_nano_-_EN_-_25_June_08.pdf (última consulta: 26/6/2008).

FoE - A (Friends of Earth - Australia) (2006). «Nanomaterials, sunscreens and cosmetics: small ingredients big risks», <http://nano.foe.org.au/node/125> (última consulta:20/3/2008).

FOLADORI, G. (2009). «La gobernanza de las nanotecnologías», *Sociológica*, vol. 24, n.º 71, pp. 125-153.

— (2012). «Riesgos a la salud y el medio ambiente en las políticas de nanotecnología de América Latina» *Sociológica* n.o. 77, pp.143-180.

FOLADORI, G., y N. INVERNIZZI (2006). «La próxima revolución industrial comienza por lo suntuario», *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, n.o 110, pp. 127-134.

— (comps.) (2008). *Nanotecnologias en América Latina*. México: Porrúa.

FOLADORI, G., y V. Fuentes (2008). «Nanotecnología en Chile. ¿Hacia una economía del conocimiento?», en G. FOLADORI y N. INVERNIZZI (comps.), *Nanotecnologías en América Latina*. México: Porrúa.

GT NANOTECNOLOGIA (GRUPO DE TRABALHO EM NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA). MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. BRASIL. NANOTECNOLOGIA (2003). «Desenvolvimento da nanociência e da nanotecnologia». Proposta do Grupo de Trabalho criado pela Portaria MCT 252 como subsídio ao Programa de Desenvolvimento da Nanociência e da Nanotecnologia do PPA 2004-2007, http://www.mct.gov.br/upd_blob/0002/2361.pdf (última consulta:31/10/2009).

INVERNIZZI, N. (2008). «Brazilian Nanotechnology Policy: opportunities and barriers for social inclusion and reduction of social inequalities». Workshop Nanotechnology, Equity, and Equality, Center for Nanotechnology and Society at Arizona State University, Tempe, AZ, 20-22 de noviembre.

ITCA (INTERNATIONAL CENTER FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT) (2007). Broad International Coalition Issues Principles for Strong Oversight of Nanotechnology, 31 de julio, http://www.icta.org/press/release.cfm?news_id=26 (última consulta:20/3/2008).

JUMA, C., y L. YEE-CHEONG (coords.) (2005). *Innovation: applying knowledge in development*. Londres: Earthscan, Millennium Project. www.unmillenniumproject.org/documents/Science-complete.pdf (última consulta:13/9/2005).

MERIDIAN INSTITUTE (2005). «Nanotechnology and the Poor: Opportunities and Risks», <http://www.merid.org/nano/gdnp/NanoandPoor-NoGraphics.pdf>.

NANOWERK-DATABASE (s/f), «Nanotechnology Nanomaterial Suppliers. Database». <http://www.nanowerk.com/nanotechnology/nanomaterial/nanomatmatrix.php> (última consulta:5/3/2009).

NS&TC (NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. COMMITTEE ON TECHNOLOGY. Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology) (2000). *National Nanotechnology Initiative. The Initiative and its Implementation Plan*. Washington D. C., <http://www.nano.gov/html/res/nni2.pdf> (última consulta:31/10/2009).

OEI (ORGANIZACIÓN DE ESTADOS IBEROAMERICANOS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA) (2009), *La nanotecnología en Iberoamérica. Situación actual y tendencias*. Informe del Observatorio Iberoamericano de Ciencia, Tecnología e Innovación del Centro de Altos Estudios Universitarios de la OEI, <http://www.oei.es/salactsi/nano.pdf> (última consulta:10/3/2009).

REPÚBLICA ARGENTINA (2005). Decreto presidencial 380/2005. Autorízase al Ministerio de Economía y Producción a constituir la Fundación Argentina de Nanotecnología http://www.fanano.gov.ar/acerca_estatuto.htm (última consulta:31/10/2009).

SALAMANCA-BUENTELLO, F., D. L. PERSAD, E. B. COURT, D. K. MARTIN, A. S. DAAR y P. SINGER (2005). «Nanotechnology and the Developing World», *PLoS Medicine*, vol. 2, n.o 5, <http://medicine.plosjournals.org/perlserv/?request=get-document&doi=10.1371/journal.pmed.0020097> (última consulta:27/7/2006).

TROUILLER, P., E. TORREELE, P. OLLIARO, N. WHITE, S. FOSTER, D. WIRTH, y B. PÉCOUL (2001). «Drugs for neglected diseases: a failure of the market and a public health failure?», *Tropical Medicine & International Health*, vol. 6, n.o 11, pp. 945-951.

UITA (2006-7). «The IUF Resolution». http://www.rel-uita.org/nanotecnologia/resolucion_uita_nano_eng.htm (última consulta:20/3/2007).

WWICS (WOODROW WILSON INTERNATIONAL CENTER FOR SCHOLARS) (2009). «A nanotechnology consumers product inventory. Project on Emerging Nanotechnologies», http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/analysis_draft/ (última consulta:31/10/2009).

ZUMLA, A. (2002). «Reflexion & Reaction - correspondence», *The Lancet*, 2 de julio.

Sobre los autores

BENECH, Juan Claudio: Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable.

BRUM, María: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UdelaR).

CABRAL, Pablo: Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, UdelaR.

CAPDEVIELLE, Fabián: Facultad de Ingeniería, Universidad ORT.

CHIMURIS, Ramiro: Miembro de la ReLANS. Miembro de Plataforma DESCAM.

CHIANCONE, Adriana: Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, UdelaR. Miembro de la ReLANS.

DAMIÁN, Juan Pablo: Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable y Departamento de Biología Molecular y Celular, Área de Bioquímica, Facultad de Veterinaria, UdelaR.

ETCHEGOIMBERRY, Dolores: Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable.

FACCIO, Ricardo: Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, UdelaR.

FOLADORI, Guillermo: Doctorado en Estudios del Desarrollo, Universidad de Zacatecas. Coordinador de la ReLANS.

GARRIDO, Lydia: Investigadora de Plataforma DESCAM. Miembro de la ReLANS.

MOMBRÚ, Álvaro: Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, UdeLaR.

ODDONE, Natalia: Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable y CINQUIFIMA, UdeLaR.

PARDO, Helena: Centro NanoMat, Polo Tecnológico de Pando, Facultad de Química, UdeLaR.

PEREYRA, Mariana: Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, UdeLaR.

PI, Natalia: Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable y Facultad de Medicina, UdeLaR.

TASSANO, Marcos: Laboratorio de Señalización Celular y Nanobiología, Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable y Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, UdeLaR.

Títulos de la colección Interdisciplinarias 2012

1. Parasitosis intestinales y estado nutricional en una escuela de Montevideo.

Ana María Acuña, Ramón Alvarez (Coordinadores)

2. La civilización en disputa.

Democracia, institucionalidad, derechos y libertades.

**Dos modelos en los debates editoriales durante la dictadura
uruguaya 1973 - 1984.**

Gerardo Albistur

3. Cambio y variabilidad climática:

Respuestas interdisciplinarias.

Valentín Picasso, Gabriela Cruz, Laura Astigarraga, Rafael Terra (Coordinadores)

4. Montevidenxs.

**Textos diversos en torno a los resultados de la investigación
exploratoria “Derechos, jóvenes LGBT y VIH/Sida”, 2011.**

Fiorella Cavalleri, Juan José Meré, Helena Modzelewski, Paribanú Freitas,
Myriam Puiggrós, Paribanú Freitas, Mariana Leoni Birriel, Stella Dominguez,
Maia Calvo Núñez

5. Las nanotecnologías en Uruguay.

Adriana Chiancone Castro, Guillermo Foladori (Coordinadores)

6. Colonia Raúl Sendic.

Un proyecto compartido

Luciana Echevarría, Valentina Soria, Gonzalo Balarini, Rodolfo Martínez

7. La teoría social latinoamericana.

Legados y desafíos.

Rafael Paternain

El mundo está entrando en una revolución tecno-científica sin precedentes: la manipulación atómica de la materia. Nanotecnologías en Uruguay es el primer diagnóstico exhaustivo sobre la investigación en nuestro país de estas tecnologías innovadoras.

La historia del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay se presenta de manera global; pero también se explica las investigaciones en curso en prácticamente todas las facultades y centros de investigación donde se realizan. Este enfoque permite al lector comprender el carácter multifacético de las nanotecnologías, que pueden ser aplicadas a cualquier campo de la ciencia. También facilita entender la manera en que se trabaja la materia a nivel atómico y sus potencialidades para generar productos de consumo con funciones nuevas o mejoradas, mediante ejemplos de aplicaciones en la medicina, la industria, el sector agropecuario, la energía y otros.

A finales del año 2009, y siguiendo la ola mundial de apoyo a las nanotecnologías, el gobierno uruguayo incluye estas tecnologías como área transversal prioritaria en su programa estratégico de desarrollo en Ciencia y Tecnología.

ISBN: 978-9974-0-0963-9



Espacio Interdisciplinario
Universidad de la República
Uruguay

+598 2408 9010 www.ei.udelar.edu.uy ei@ei.udelar.edu.uy
José Enrique Rodó 1843, 11200 Montevideo Uruguay