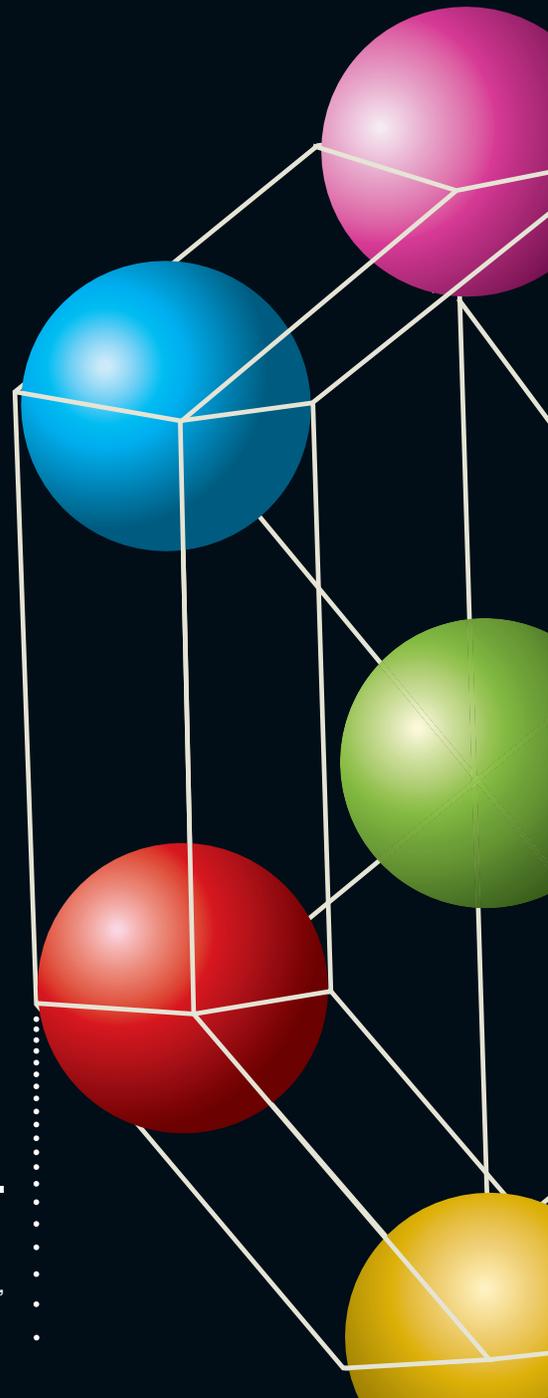
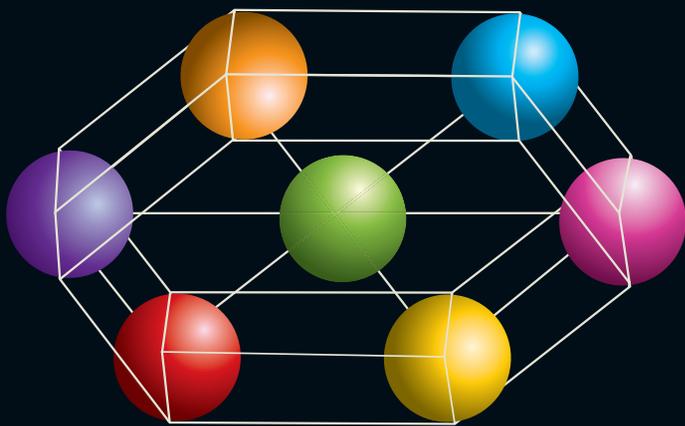
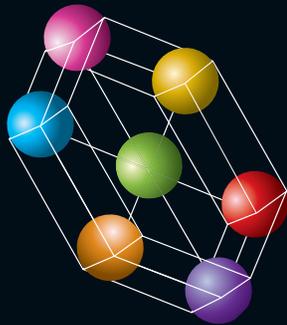


ÉTICA Y POLÍTICA DE LA NANOTECNOLOGÍA



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura

Este folleto ha sido preparado gracias a la ayuda y asesoramiento científico del Dr. Christopher M. Kelty de la Universidad Rice (Estados Unidos de América)

Las denominaciones empleadas y la presentación adoptada en la publicación no implican opinión alguna de la UNESCO sobre la condición jurídica de cualesquiera países, ciudades o zonas, o de las autoridades o fronteras de éstos.

Publicado en 2007
por la Organización de las Naciones Unidas
para la Educación, la Ciencia y la Cultura
7, place de Fontenoy, 75352 PARÍS 07 SP

Compuesto e impreso en los talleres de la UNESCO

Diseño gráfico : Anna Mortreux

© UNESCO 2006
Printed in France

(SHS-2007/WS/01)



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



ÉTICA Y POLÍTICA DE LA NANOTECNOLOGÍA

Índice

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	La UNESCO y la nanotecnología	3
1.2	¿Qué es la nanotecnología?	4
1.3	Historia	7
2	INVESTIGACIONES ACTUALES SOBRE NANOTECNOLOGÍA	12
3	REPERCUSIONES ÉTICAS, JURÍDICAS Y POLÍTICAS DE LA NANOTECNOLOGÍA	15
3.1	Aspectos internacionales de la nanotecnología	15
3.2	Toxicidad y repercusiones ambientales de la nanotecnología	17
3.3	Más allá de la evaluación de los riesgos	20
3.4	Ética de la ciencia	21
3.5	Desviaciones del debate – Cuestiones éticas que no son tales	23
4	CONCLUSIÓN	25
5	APÉNDICE	27
	Índice de informes sobre las nanotecnologías	29

I

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología podría llegar a ser el factor más influyente que haya conocido la industria tecnológica desde el auge de Internet. Gracias a ella sería posible aumentar la velocidad de los microprocesadores de memoria, eliminar partículas contaminantes del agua y el aire o detectar más rápidamente las células cancerosas. También podría ocurrir que escapara a nuestro control y significara el fin de nuestra existencia como seres humanos. Con la nanotecnología se podría aliviar el hambre en el mundo, limpiar el medio ambiente, curar el cáncer, conseguir longevidades bíblicas o engendrar superarmas pavorosas. También podría constituir el nuevo amianto. Quizá impulsara el desarrollo económico gracias a los frutos indirectos de la investigación, o quizá lastrara las oportunidades de los pobres en los países en desarrollo. Con la nanotecnología se podrían fabricar helados con moléculas de tamaño más uniforme, o cámaras digitales que funcionaran en la oscuridad. Sería posible limpiar residuos tóxicos actuando a escala atómica. La nanotecnología podría cambiar la faz de la Tierra, convertirse en instrumento de terroristas o inducir la próxima revolución industrial. Con ella

también se podría transformar la industria alimentaria o reparar la capa de ozono. La nanotecnología podría cambiarlo todo.

Esta es una pequeña selección representativa de lo que, dicen algunos, la nanotecnología “podría” traer consigo. ¿Qué hacer de tan contradictoria amalgama de buenos y malos augurios? ¿Cómo puede una sola cosa encerrar tal universo de posibilidades, aun teniendo en cuenta lo dados que son a la hipérbole los periodistas y expertos en comunicación? Pese a tan desatadas cábalas, sí hay, de hecho, algo que es específico de la nanotecnología, y los ciudadanos, políticos, científicos y empresarios interesados en la cuestión deberían ocuparse de una serie de temas muy concretos. Para valorar los aspectos éticos, jurídicos y políticos de la nanotecnología es indispensable distinguir entre las posibilidades controlables que encierra y las consecuencias imprevisibles a que puede dar lugar. En este documento se expone brevemente lo que es la ciencia de la nanotecnología y se explican algunas de las cuestiones éticas, jurídicas y políticas que deberá afrontar en un futuro próximo la comunidad internacional.

I.1 LA UNESCO Y LA NANOTECNOLOGÍA

El desarrollo de la ciencia y la tecnología está cambiando sustancialmente la existencia del ser humano: la tecnología hace la vida más segura y menos pesada; la ciencia médica ha mejorado notablemente la salud de los ciudadanos, y la tecnología sanitaria ha contribuido a mejorar la salud pública; la tecnología de la información ha multiplicado las posibilidades y el alcance de la comunicación entre las personas; las ciencias ecológicas han dado lugar a medios de producción y consumo más sostenibles; y las ciencias de la vida están inventando nuevos productos y medicamentos. La nanotecnología guarda relación con todos esos ámbitos y plantea muchos de los mismos interrogantes éticos. Por ejemplo: la ciencia puede ser beneficiosa para el ser humano, pero ¿quién se beneficia actualmente de ella? Importantes adelantos de la ciencia y la tecnología se efectúan a menudo en los países más desarrollados aprovechando recursos procedentes de países menos

desarrollados, pero éstos no suelen disfrutar de los resultados y productos finales del proceso. Además, la ciencia y la tecnología son hoy actividades eminentemente internacionales. La investigación médica, por ejemplo, procede por ensayos a gran escala que se realizan simultáneamente en muchos centros de todo el mundo. Los ciudadanos de países en desarrollo son los sujetos de proyectos de investigación que se coordinan desde países desarrollados, y sin embargo parece claro que no se aplican siempre los mismos criterios éticos en todos los países. Para evitar este doble rasero en la ética de la ciencia y la tecnología, resulta cada vez más necesario abordar el tema a escala internacional.

Todas estas consideraciones han llevado a los Estados Miembros de la UNESCO a otorgar prioridad a la ética en su programa de trabajo. Desde los años 70, la UNESCO se había interesado puntualmente por la

dimensión ética de las ciencias de la vida, en especial la genética. En 1993, sus Estados Miembros crearon el Comité Internacional de Bioética (CIB), que reúne a 36 expertos de todas las disciplinas y regiones del mundo para que formulen recomendaciones sobre temas delicados en relación con la bioética. A petición de los Estados Miembros, el CIB participó en la redacción de reglas que pudieran ofrecer a todos los países una serie de principios de referencia en materia de bioética. En 1997 la Conferencia General de la UNESCO aprobó la *Declaración Universal sobre el Genoma Humano y los Derechos Humanos*, a la que siguió en 2003 la *Declaración Internacional sobre los Datos Genéticos Humanos*. Dada la creciente importancia de la bioética en el plano mundial, los Estados Miembros de la UNESCO han aprobado en fechas recientes (octubre de 2005) la *Declaración Universal sobre Bioética y Derechos Humanos*. Pero la definición de reglas no basta. Para aplicarlas y hacer que se cumplan en la práctica se han puesto en marcha actividades de capacitación, consistentes por ejemplo en fomentar la enseñanza de la ética, establecer comités de ética e intercambiar experiencias en la materia.

En 1998, la creación por los Estados Miembros de la UNESCO de la Comisión Mundial de Ética del Conocimiento Científico y la Tecnología (COMEST) puso de manifiesto que existía cada vez mayor conciencia de los problemas éticos que plantean la ciencia y la tecnología. Este comité internacional, formado por 18 expertos, asesora a la Organización sobre la aplicación de la ética en ámbitos como la ciencia, el medio ambiente o la tecnología. La COMEST tiene el mandato específico de: 1) ejercer de foro intelectual para el intercambio de ideas y experiencias; 2) a

partir de ahí, detectar los primeros signos premonitorios de situaciones de riesgo; 3) asesorar sobre el tema a las instancias decisorias; y 4) promover el diálogo entre círculos científicos, instancias decisorias y el público en general. Siguiendo este mandato, la COMEST ha comenzado a trabajar sobre la tecnología de la información, los usos del agua y las técnicas hidrológicas, la energía y la tecnología del espacio. El CIB, por su parte, desempeña funciones similares, pero centradas en la bioética: se ocupa de promover la reflexión sobre los problemas éticos y jurídicos que plantean la investigación en ciencias de la vida y sus aplicaciones, y también de alentar el intercambio de ideas e información, en particular a través de la enseñanza.

El presente documento responde al mandato ético de la UNESCO. Ante todo conviene describir y analizar los problemas éticos ligados a la nanotecnología, de forma que el público en general, los círculos de especialistas y las instancias decisorias tomen conciencia de lo que estas nuevas técnicas entrañan. Dada la rapidez a la que éstas evolucionan, es preciso ocuparse con anticipación de las cuestiones éticas que puedan plantear. En vez de esperar a que la opinión pública manifieste inquietud y surjan debates morales, el CIB y la COMEST tienen el cometido de seguir de cerca y constantemente los posibles beneficios y perjuicios de las técnicas nuevas o incipientes como la nanotecnología. Esta es también la contribución que puede hacer la UNESCO: promover en el plano internacional y desde un punto de vista planetario el debate entre todas las partes interesadas, y formular recomendaciones a las instancias que habrán de dar respuesta a los problemas morales planteados por las tecnologías que vayan surgiendo o evolucionando.

I.2 ¿QUÉ ES LA NANOTECNOLOGÍA?

Hay actualmente en circulación docenas de definiciones de lo que es o podría ser la nanotecnología, y es importante dejar claro que ninguna de ellas ha suscitado la unanimidad. Las definiciones también tienen una dimensión política y ética, pues de ellas pueden depender los temas de los que se ocupe o preocupe la gente, los que deje de lado o los que vayan a ser objeto de investigación. La proliferación de definiciones es señal de que la nanotecnología (al igual que otras disciplinas científicas recientes, como las de la biotecnología) introducirá seguramente cierta confusión en las arraigadas categorías de la investigación: fundamental frente a aplicada, y pública frente a privada. Las diferentes preocupa-

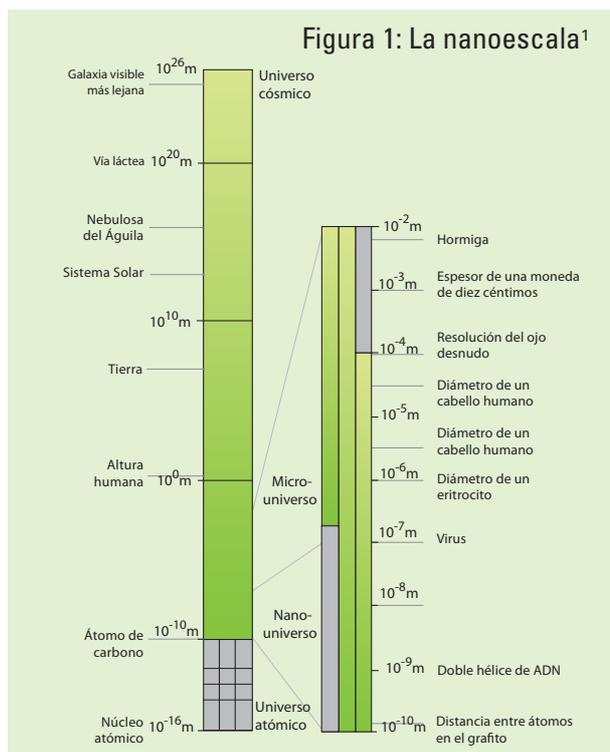
ciones e ideas procedentes de distintas disciplinas e instituciones científicas nacionales van a influir en el futuro de la nanotecnología.

Para empezar, ¿es nanociencia o nanotecnología? En este documento se utiliza el término “nanotecnología” para designar la investigación científica tanto fundamental como aplicada. Sin embargo, muchas cosas que podríamos adscribir a la categoría de “fundamental” requieren instrumentos, procedimientos, material y técnicas que son esencialmente tecnológicos (computadoras y programas informáticos, complejos microscopios e instrumental para efectuar mediciones y manipulaciones físicas o

químicas). Análogamente, los científicos consideran hoy que muchas actividades que podríamos calificar de ingeniería porque entrañan la creación de aparatos o máquinas corresponden a una “investigación fundamental” sobre la mecánica de la naturaleza. En el campo de la nanotecnología, por lo tanto, la ciencia y la tecnología son interdependientes y están estrechamente relacionadas.

También la clásica distinción entre ciencia “aplicada” y “fundamental” resulta problemática cuando se trata de la nanotecnología, pues lleva a la gente a confundir *las investigaciones que realmente efectúan científicos e ingenieros* con las proyecciones de observadores, financieros o científicos entusiastas sobre sus eventuales resultados. Muy a menudo, al hablar de nanotecnología, la gente confunde los resultados previstos (posibles beneficios y riesgos) con el actual estado de la cuestión en laboratorios y empresas. Los resultados previstos de la ciencia incumben a la política social, son y deben ser objeto de debate entre los ciudadanos, de todas las naciones y, no sólo, entre científicos o políticos. No se trata de consecuencias ineluctables, ni tampoco están determinados, aunque sí limitados, por la investigación fundamental. El deber de los científicos, como ciudadanos, debería ser el de cuestionar y criticar resultados irrealistas o peligrosos, y no sólo proponer perspectivas halagüeñas. La investigación actual en nanotecnología debería vertebrar la política social como parte integrante de un sistema de controles y equilibrios, no como fundamento de dicha política.

Así pues: ¿qué es la nanotecnología? Quizá la definición más sencilla y general consista en decir que es la investigación realizada a nanoescala (10^{-9} metros,



o una milmillonésima parte de un metro. Para dar una idea, digamos que un cabello humano tiene unos 20.000 nm de diámetro). ¿Cuán pequeña es la nanoescala? (Véase la Figura 1). Moléculas, virus y átomos son estructuras que miden desde menos de 1 nm (átomos) hasta unos 100 nm (moléculas grandes como el ADN). Son demasiado pequeñas para ser percibidas a simple vista, o incluso con microscopio óptico. De ahí la importancia de las nuevas técnicas de visualización como el microscopio de túnel de barrido o el de fuerza atómica, no sólo para ver sino también para manipular cosas a tan pequeña escala.

Recuadro 1

Según la definición oficial de la *National Nanotechnology Initiative* estadounidense, la nanotecnología entraña “investigación y desarrollo tecnológico a escala atómica, molecular o macromolecular, de un orden de longitud de aproximadamente 1 a 100 nm, para acceder a una comprensión básica de los fenómenos y materiales a nanoescala y para crear y utilizar estructuras, aparatos y sistemas que revistan nuevas propiedades y funciones justamente por ser de pequeño y/o mediano tamaño”.

Las definiciones difieren según lo que más interesa en cada país. En China, Corea y Japón se pone el acento en los materiales y especialmente en la electrónica, mientras que los investigadores africanos y latinoamericanos suelen hacer hincapié en los materiales en el contexto de la medicina y las ciencias ambientales. La *Royal Society* británica distingue entre “nanociencia” y “nanotecnología”, entendiendo que la primera incluye el “estudio y la manipulación” de partículas a nanoescala y que la segunda corresponde a la “concepción, caracterización y construcción” de “estructuras, aparatos y sistemas” a esa escala.

¹ Adaptado de <http://invsee.asu.edu/nmodules/sizescalemod/unit3.htm>.

Sin embargo, esta definición es a todas luces demasiado general. La química, la física y la biología llevan al menos 100 años trabajando con objetos de ese orden de tamaños, y mucho más tiempo aún discutiendo su estructura, composición o incluso existencia. Una definición más concreta sería por ejemplo la que suele utilizar la *National Nanotechnology Initiative* estadounidense (véase el Recuadro 1). La mayor parte de lo que sabemos sobre el comportamiento de los átomos, las moléculas y el mundo físico es fruto de investigaciones realizadas a mayor escala (pensemos en la física de una pelota de béisbol o en la dureza del diamante). A nanoescala, en cambio, se observa que las propiedades cambian bastante. Por ejemplo: con luz natural, el ojo humano ve el oro de color amarillo, pero las minúsculas nanopartículas de ese metal (que flotan en el agua, pongamos por caso) pueden tener color rojo, porque sólo reflejan la luz roja del espectro. Análogamente, la conductividad eléctrica del carbono en forma de “nanotubos” es mucho mayor que la del diamante debido a las diferencias de estructura molecular (a nanoescala) entre ambas formas de carbonos. Como se infiere de la definición, estas nuevas propiedades podrían utilizarse para nuevas aplicaciones, y ello explica en buena parte el entusiasmo que despierta la nanotecnología. El hecho de que a nanoescala el oro refleje la luz roja se aprovecha para concebir sistemas experimentales que, bajo luz visible normal, eliminen las células cancerosas y dejen intactas las normales.

También se han propuesto otras definiciones de nanotecnología aún más específicas, relacionadas con la función de *control* a nanoescala. Entender y observar las nuevas propiedades de los objetos a nanoescala sólo resulta útil (en el sentido de la ingeniería) si existe la posibilidad de manipular y utilizar esos objetos creando nuevas combinaciones de moléculas, nuevas máquinas y aparatos o, yendo aún más lejos en la especulación, fábricas diminutas. Esta definición de nanotecnología suele venir unida a la expresión “fabricación molecular”, y en los últimos veinte años ha sido uno de los temas más atractivos para los escritores de ciencia-ficción. Con ella se restringen notablemente los *resultados previstos* de la nanotecnología, circunscribiéndolos al trabajo de ingenieros y científicos para construir

todo tipo de productos y materiales “empezando desde abajo”, o lo que es lo mismo: creándolos átomo por átomo con fábricas a nanoescala. La ventaja de este planteamiento radicaría en su flexibilidad casi infinita para generar cualquier sustancia, objeto, aparato, máquina o material construyéndolos átomo por átomo. Hoy se aplica el planteamiento alternativo, consistente en “empezar desde arriba”, o dicho de otro modo: reunir o aliar sustancias naturales mediante un proceso específico de cada producto. Ningún científico en activo ha creado una de esas máquinas “empezando desde abajo”, y pocos son los que trabajan sobre el tema, cosa que no ha impedido que se celebraran de modo totalmente abierto debates sobre la posibilidad teórica de conseguir semejante proceso de fabricación, aun a falta de toda labor experimental de cierta entidad.² La posibilidad (y a la vez amenaza) de la fabricación molecular es muy marginal con respecto a otros temas que van a plantearse a corto plazo, que se abordan en la tercera parte de este documento.

La definición de nanotecnología como fabricación de aparatos a nanoescala, y no como el simple estudio de los objetos a esa escala, ha llevado a algunos científicos a proponer otra nueva definición (o redefinición, en este caso).³ El estudio de la “nano-biotecnología” redefine los ubicuos objetos de estudio de la biología y la química (a saber, las moléculas) como máquinas diminutas. Así, por ejemplo, la molécula de ATP, componente esencial del ciclo celular de todos los seres vivos, ha recibido la denominación de “nanomotor”, al igual que la actina, integrante del binomio molecular actina/micina, responsable del estímulo eléctrico que controla los latidos del corazón.⁴ La redefinición de la biología y la química como nano-bio-tecnología podría parecer simplemente un intento pusilánime de atraer la atención hacia la ciencia tradicional, pero ahí rige la misma distinción que antes: si estos diminutos motores y dispositivos biológicos se aprovechan y manipulan para hacer cosas hasta ahora desconocidas o inconcebibles (si el ADN hace las veces de pinza, o si se emplea la molécula de “prestina” para hacer girar un minúsculo engranaje), el componente esencial de la definición no es el mero estudio, sino el *aprovechamiento* de los motores moleculares, las moléculas y la maquinaria de la vida.

² Con la salvedad de la creación de los ordenadores cuánticos y moleculares, aunque estas máquinas no fabrican nada ni se consideran lo bastante fiables o sólidas como para ser de utilidad práctica. Demuestran, en cambio, que es posible utilizar objetos a nanoescala como semiconductores y transistores para operaciones de cálculo y almacenamiento de memoria.

³ Whitesides, G.M. 2001. “The once and future nanomachine”. *Scientific American*, vol. 285, no 3, septiembre, págs. 78-83. [Versión en español: “Máquinas nanométricas antiguas y futuras”, *Investigación y ciencia*, no 302, noviembre de 2001.]

⁴ Goodsell, D.S. 2004. *Bionanotechnology: Lessons from Nature*. Hoboken (Nueva Jersey, EE.UU.), Wiley-Liss.

Por último, existe aún otra definición de nanotecnología: la de la “nano-bio-info-cognoconvergencia” de la *National Science Foundation estadounidense*,⁵ que la define como un nuevo tipo de ciencia que surge del encuentro a nanoescala de la biología, la tecnología de la información y las ciencias cognitivas. Es en cierto modo la definición más radical, en la medida en que trata de aprehender la utilización de la nanotecnología para “mejorar el rendimiento humano”. Aunque es verdad que muchos de los temas que surgen al estudiar y utilizar objetos a nanoescala requieren conocimientos especializados en varias disciplinas, por ahora hay pocos científicos o laboratorios capaces de trabajar en este territorio de “convergencia”.

Distintos grupos humanos definen de forma distinta la nanotecnología en función de lo que esperan conseguir con ella, ya guarde relación con el cuerpo humano y la medicina, el medio ambiente o

los nuevos materiales u objetos biológicos. Las definiciones también difieren según los intereses de las naciones o los agentes sociales vinculados al tema. Puesto que aún media un abismo entre los *resultados previstos* y las *investigaciones efectivamente realizadas*, la definición es objeto de ásperos debates y constituye un aspecto importante de la dimensión ética y política de la cuestión. Desde el punto de vista de la UNESCO, los países, aun cuando no participen activamente en las investigaciones sobre el tema, deberían tener voz en el capítulo de la definición de los resultados previstos y del rumbo en la práctica se imprime a la investigación conforme a reglas de equidad, justicia y ecuanimidad. De lo contrario serán las empresas y naciones que defiendan sus intereses con más firmeza las que acaben definiendo la nanotecnología. En estas fases iniciales, los ciudadanos de todos los países deberían participar en el proceso de aprehender lo que es y puede ser en el futuro la nanotecnología.

1.3 HISTORIA

Así como son muchas las definiciones de nanotecnología, su historia puede ser narrada y lo es, -en efecto- de múltiples maneras, con distintos puntos de origen e importantes hitos.

Acaso el punto de origen que se menciona más a menudo sea la conferencia que pronunció el famoso físico Richard Feynman con el título “Hay muchísimo espacio en el fondo”⁶, en la que Feynman especuló acerca de las posibles maneras en que se puede utilizar la miniaturización, las computadoras y las tecnologías de la información y la física para explorar el mundo submicroscópico. Con su brío característico, Feynman expuso una serie de cosas que a su juicio sería fácil realizar en un futuro próximo. Cuarenta años más tarde, muchos ingenieros y científicos todavía sienten entusiasmo por esas predicciones; pero, a decir verdad, ninguna de ellas se ha hecho aún realidad. Un trabajo conexo

que a veces se menciona del mismo periodo es la obra de John von Neumann sobre la *Teoría general y lógica de los autómatas*, en la que combinó de modo similar su conocimiento de la física, la ingeniería y la tecnología de la información para proponer la creación de máquinas autónomas, si bien, en su caso, no a nanoescala⁷.

Ahora bien, ni Feynman ni von Neumann se refirieron a estas posibilidades empleando la palabra “nanotecnología”, que fue popularizada en un libro escrito por K. Eric Drexler -un inveterado visionario de la nanotecnología- de “historia futura” titulado *Los motores de la creación*⁸. Drexler utilizó la palabra para describir su visión de un mundo en el que la fabricación de moléculas permitiría a las personas manufacturar cualquier cosa que pudieran necesitar -desde automóviles a pedazos de buque- simplemente introduciendo desechos en una caja que utilizaría

⁵ Roco, M.C. y Bainbridge, W.S. 2003. *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*. Boston (Massachusetts), Kluwer Academic Publishers.

⁶ Feynman, R. 1960, “There’s plenty of room at the bottom”, *Engineering and Science*, Vol. 23, No 5, febrero, págs. 22-36.

⁷ von Neumann, J., y Burks, A. W., 1966, *Theory of Self-Reproducing Automata*, Urbana (Illinois), University of Illinois Press. Véase también la contribución de Jean-Pierre Dupuy al reciente informe de la Unión Europea sobre salud y medio ambiente mencionado al final del documento.

⁸ Drexler, K. E., 1986, *Engines of Creation*, Garden City, Nueva York, Anchor Press/Doubleday.

ensambladores a nanoescala para reconfigurarlos en la forma necesaria (véase la Figura 2). Hoy día, se recuerda más a menudo el libro de Drexler por su promesa distópica que por su promesa utópica: Drexler advirtió de que, conforme se desarrollara esta tecnología, sería preciso precaverse frente a la liberación accidental de nanomáquinas autorreplantes autónomas que -si escapaban a todo control y empezaban a consumir o a transformar el mundo natural y el mundo antropogénico- podrían convertir el planeta en una “gelatina gris” inhabitable. Proyecto de aparato manufacturero molecular a escala de mesa de escritorio. Unas máquinas minúsculas juntan moléculas y posteriormente piezas cada vez mayores, en un proceso de ensamblaje convergente que realiza productos como computadoras con mil millones de procesadores. (Las partes aparecen en forma de cubos blancos.) Drexler ha desempeñado un importante papel en lo que se refiere a suscitar entusiasmo y temor por la nanotecnología a lo largo de los años. Ha fundado un instituto consagrado a estudiar las posibles consecuencias científicas y sociales de la nanotecnología (el Foresight Institute) y ha escrito un libro de ingeniería teórica en el que afirma la viabilidad de la manufactura molecular¹⁰. Ahora bien, en la actualidad no hay ninguna demostración experimental de ingeniería convincente ni siquiera de un control molecular sencillísimo y, como consecuencia de ello, ha habido una importante reacción contra la idea de la nanotecnología en tanto que manufactura molecular, impulsada en parte por la aparición y generalización de hipótesis sobre evoluciones posibles que a juicio de muchos científicos e ingenieros son inviables científica y socialmente. Uno de los demás eminentes científicos que han promovido la nanotecnología, Richard Smalley, de la Universidad Rice, ha acusado a Drexler de “asustar a nuestros hijos” y promulgar una visión del futuro basada en razonamientos científicos incorrectos¹¹. La marginación y el ostracismo por la comunidad científica del concepto de manufactura molecular ha llevado recientemente a Drexler a lamentar el haber acuñado la expresión “gelatina gris”.

Ahora bien, en los últimos 40 años, un número considerable de verdaderos avances científicos y de la ingeniería han transformado las interrogantes científicas anteriores en nuevas interrogantes nano-



Figura 2:
Fabricación de la
mesa de escritorio⁹

Proyecto de aparato manufacturero molecular a escala de mesa de escritorio. Unas máquinas minúsculas juntan moléculas y posteriormente piezas cada vez mayores, en un proceso de ensamblaje convergente que realiza productos como computadoras con mil millones de procesadores. (Las partes aparecen en forma de cubos blancos.)

tecnológicas. Entre aquéllos destaca la invención de los microscopios de túnel de barrido (STM) y de fuerza atómica (AFM), gracias a los cuales los científicos han visualizado, investigado y, en último término, explorado y experimentado cosas a escalas antes imposibles. Entre finales del decenio 1970 y 1983, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer sentaron las bases del microscopio de túnel de barrido, trabajo por el cual compartieron el Premio Nobel de 1986 con Ernest Ruska, quien diseñó el primer microscopio electrónico. Los STM se basan en la extraña propiedad del “barrido de quanta” para explorar y medir fielmente la configuración de los electrones que giran en torno a los átomos. A partir de esta información, una computadora puede generar una representación visual del átomo (Figura 3).

Unos pocos años después, Gerd Binnig participó también en la invención del microscopio de fuerza atómica (AFM) en los laboratorios de la empresa IBM de Zurich (Suiza). El AFM ha sido puesto comercialmente a disposición de los científicos sólo desde 1990 aproximadamente y funciona a partir de un principio muy similar al de un gramófono clásico, en el que un “brazo” con una aguja fina se arrastra

⁹ Crédito de la imagen: John Burch, Lizard Fire Studios, <http://www.lizardfire.com>

¹⁰ Drexler, K.E., 1992, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*. Nueva York, Wiley.

¹¹ En diciembre de 2003 tuvo lugar un debate público y algo áspero en la revista *Chemical and Engineering News*, Vol. 81, No 48, págs. 37-42.

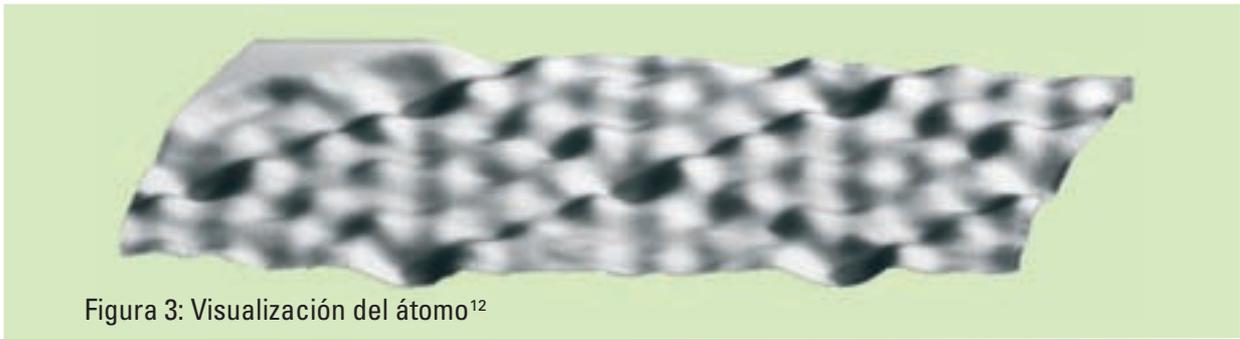


Figura 3: Visualización del átomo¹²

sobre una superficie. Empleando un rayo láser, se puede registrar y transformar en una imagen digital -como en el STM- las minúsculas variaciones a nanoescala de la punta de la cabeza conforme va chocando con los átomos de una muestra.

Estos instrumentos permitieron a los ingenieros y científicos crear imágenes asombrosas que muestran la configuración de los átomos y las moléculas. Ahora bien, no sólo la capacidad para ver los átomos es lo que hace que sean tan fascinadores, sino la capacidad para manipular realmente, es decir, mover o disponer átomos en configuraciones artificiales. Uno de los científicos que están a la cabeza del empleo de estos instrumentos es Donald Eigler, de IBM Research, en Almaden (California). En 1989, Eigler demostró esa posible utilización del STM disponiendo varios átomos de xenón en un vacío de forma que compusieran el acrónimo "IBM". Posteriormente, Eigler y sus alumnos pudieron utilizar el STM para crear una amplia variedad de imágenes basadas en las manipulaciones de átomos y moléculas, por ejemplo, el "corral cuántico" (Figura 4), que demuestra visualmente la dualidad onda/partícula de los electrones a escala atómica, y la creación de puertas lógicas (puertas como las empleadas en las computadoras para determinar las funciones lógicas Y, O y NO utilizando átomos de monóxido de carbono ordenados de modo tal que "cayesen como fichas de dominó según lo que entrara por la puerta"¹³.

Otro avance científico importantísimo que ha contribuido a aumentar el entusiasmo por la nanotecnología fue el descubrimiento de las "buckyballs" ("balones de Bucky") o los "buckminsterfullerenos", que son moléculas en forma de balón de fútbol compuestas por 60 átomos de carbono. Las "buckyballs" (C_{60}) y otras estructuras de carbono casi esféricas

como el C_{70} y los derivados que las reemplazan se denominan colectivamente "fullerenos".

Las buckyballs se denominan así por el famoso arquitecto y futurista Buckminster Fuller, cuyas cúpulas geodésicas comparten la forma característica del balón de fútbol de la molécula. Como el diamante y el grafito, están compuestas totalmente de carbono, pero su forma y su estructura molecular les dotan de propiedades especiales. En un experimento realizado en 1984, los profesores Richard Smalley y Robert Curl, los alumnos de licenciatura Jim Heath y Sean O'Brien, de la Universidad Rice (Estados Unidos de América), y Harold Kroto, de la Universidad de Sussex (Reino Unido), fueron los primeros en identificar y caracterizar los "buckminsterfullerenos". Las buckyballs fueron sintetizadas por vez primera utilizando un complicado artefacto concebido para vaporizar grafito y hacerlo pasar por una abertura minúscula, y fueron caracterizadas por Curl como moléculas formadas por 60 átomos de carbono ordenados en pentágonos y hexágonos alternados. En aquella época, no denominaron a esta labor nanotecnología, sino meramente química. Su capacidad para sintetizar esas moléculas suscitó pronto la atención hacia su trabajo, por poseer propiedades importantes y nuevas que podían ser

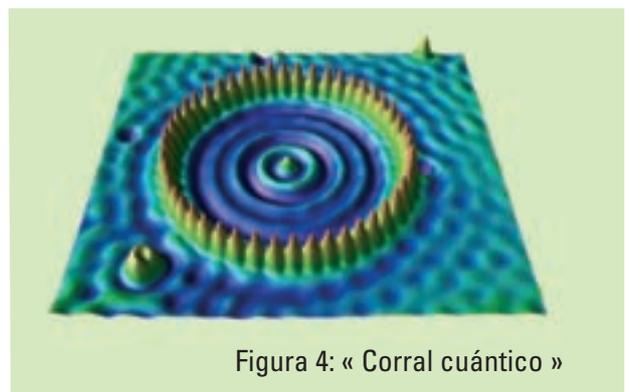


Figura 4: « Corral cuántico »

¹² Imagen reproducida con permiso de Binnig, G. Y Rohrer, H., 1987. "Scanning tunneling microscopy: From birth to adolescence". *Reviews of Modern Physics*, Vol. 59, No 3, pág. 622. Copyright, 1987, American Physical Society.

¹³ Imagen de corral cuántico procedente de Eigler, D.M., y Schweizer, E.K., 1990, "Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope", *Nature*, Vol. 344, 5 de abril, págs. 524-526.

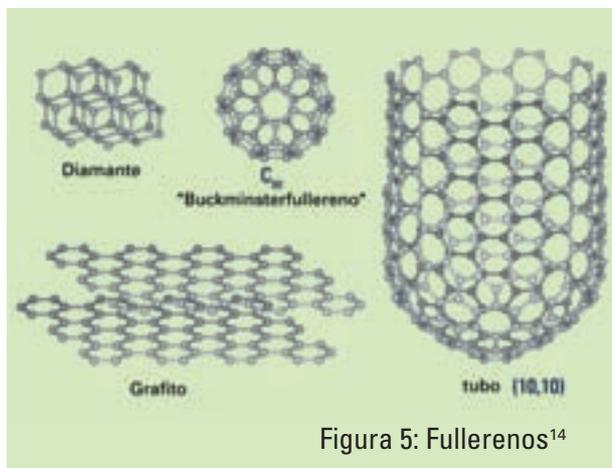
aprovechadas. Smalley, Curl y Kroto fueron galardonados con el Premio Nobel en 1996.

En 1991, S. Iijima, que trabajaba en la empresa japonesa NEC, descubrió otra variante de las buckyballs, denominada nanotubos. Los nanotubos pueden tener una sola pared o varias y cuando sólo tienen una pared son en lo fundamental largos cilindros de carbono que tienen la mitad de una buckyball en cada extremo (Figura 5). Los nanotubos de una sola pared son más versátiles que la forma de buckyball y hay autores que consideran que son el material más fuerte y flexible descubierto hasta la fecha. Además, tienen una elevadísima conductividad eléctrica (similar a la del cobre y la del oro, pero en un alambre mucho menor), además de elevada conductividad térmica. Estas propiedades han hecho proliferar las predicciones, desde las más prácticas (un nuevo alambre a nanoescala que conduzca energía e información) a las fantásticas (un “ascensor espacial”, es decir, un largo “cable” delgado formado por nanotubos que elevaría una nave espacial al espacio, obviando la necesidad de utilizar un cohete para ello).

Una de las disciplinas menos “brillantes” que se ha sumado rápidamente a la investigación de la nanotecnología ha sido la de las ciencias de los polímeros, que desde hace más de 60 años experimenta procedimientos para fabricar nuevos materiales, naturales y sintéticos.

Se ha indicado que los nanotubos de carbono, en particular, podrían proporcionar excelentes materiales para, por ejemplo, parachoques de vehículos o alas de aviones de caza, pero como resulta difícil producirlos en grandes cantidades, eso pone trabas a las posibilidades de experimentación, distribución o promoción en grandes cantidades. Uno de los primeros ámbitos en los que se han realizado inversiones comerciales (y en los que se presentarán eventualmente problemas de reglamentación o ambientales), ha sido el de la producción a gran escala de nanotubos con una sola pared con fines experimentales en universidades y laboratorios de empresas. La empresa japonesa Mitsubishi, por ejemplo, ha realizado esfuerzos considerables para producir cantidades importantes de fullerenos.¹⁵

Los que se han interesado por las buckyballs y los nanotubos han sido ante todo los químicos, los ingenieros químicos y los físicos. Pero los ingenieros electrónicos y, en particular, los que se ocupan de la fabricación y perfeccionamiento de semiconductores y de elementos micro-electrónicos se han ido acer-



cando rápidamente a la nanoescala en sus esfuerzos por miniaturizar dispositivos y elementos electrónicos. El humilde transistor, introducido a finales de los años 1940, ha llegado a ser tan pequeño que los ingenieros tienen que enfrentarse ahora con las “nuevas propiedades” que empiezan a manifestarse en los materiales a nanoescala. Y a medida que van apareciendo esas nuevas propiedades, es indispensable disponer de tipos y configuraciones nuevos de materiales para dispositivos más pequeños, más rápidos y de menor consumo. Tal vez el más pequeño de los dispositivos que haya sido creado por el momento sea el “punto cuántico”, destinado a almacenar una carga eléctrica única que pueda utilizarse como elemento básico de una computadora. Se han efectuado investigaciones y experimentos sobre los puntos cuánticos desde principios de los años 1990, pero todavía no se utilizan en los dispositivos informáticos en venta. Los puntos cuánticos tienen además propiedades foto-físicas únicas, y se están haciendo investigaciones sobre su posible utilización en la imaginaria biomédica.

Además de la química y la ingeniería eléctrica, en otros ámbitos como la biología molecular y la ingeniería genética se han realizado progresos considerables en los diez a quince últimos años en materia

¹⁴ Imagen de carbono de <http://cohesion.rice.edu/naturalsciences/smalley/emplibary/allotropes.jpg>.

¹⁵ Véase : Tremblay, J.F. 2003. “Fullerenes by the Ton : Mitsubishi’s Frontier Carbon expects a big market for buckyballs”, *Chemical and Engineering News*, Vol. 81, N° 32, págs. 13-14.

de manipulación de los componentes básicos de la vida celular a nanoescala molecular. Las técnicas y los instrumentos de que disponen los bioquímicos y los biólogos moleculares, como el ADN recombinado y la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) han acelerado considerablemente los tipos de manipulaciones y experimentos que pueden hacerse con el ADN, el ARN y las proteínas. Como ya se señaló anteriormente, empieza a hablarse ahora de “nanotecnología” para referirse a parte de ese trabajo porque está encaminado a aprovechar las propiedades de los organismos vivos o de las moléculas asociadas a la vida orgánica. Desde 2000 aproximadamente, la nanobiotecnología ha empezado a convertirse en un campo de investigación por derecho propio.

Sólo a partir de 1996, aproximadamente, empezó el Gobierno de los Estados Unidos (y después los del Japón y los países de la Unión Europea) a estudiar seriamente la posibilidad de financiar investigaciones dedicadas a la nanotecnología de modo específico. En 2001, el Gobierno de los Estados Unidos anunció una iniciativa nacional sobre nanotecnología (*National Nanotechnology Initiative*), una iniciativa interinstitucional de coordinación de las investigaciones de los distintos organismos oficiales

de financiación de la investigación y desarrollo. La National Science Foundation estadounidense ha desempeñado un papel determinante en la financiación de la nanotecnología, en particular mediante la creación de centros regionales, centrados en problemas específicos en ese ámbito. Esos 14 centros (en 2005) están a su vez encargados de distribuir los fondos entre investigadores y coordinar proyectos y objetivos en sus distintos campos.

Tras este fuerte aumento inicial de la financiación de las investigaciones en los Estados Unidos, varios países más han empezado a financiar seriamente investigaciones relacionadas con la nanotecnología. El ministerio japonés de educación, cultura, deporte, ciencia y tecnología ha aportado una contribución de unos 250 millones de dólares a las investigaciones en distintos ámbitos de la nanotecnología. Según la Royal Society británica, la financiación en la Unión Europea asciende actualmente a 1.000 millones de euros, y el Reino Unido está gastando actualmente unos 45 millones de libras por año. Añádase a esto que tanto China como la República Islámica del Irán, Brasil e Israel han manifestado claramente que las nanotecnologías forman parte de las prioridades nacionales de investigación en ciencia y tecnología.

2

INVESTIGACIONES ACTUALES SOBRE NANOTECNOLOGÍA

Los proyectos de investigación que se están llevando a cabo hoy en día en el ámbito de la nanotecnología son sumamente numerosos. Se puede decir sin riesgo de error que, con las recientes aportaciones de financiación y la atención que ha suscitado, no hay una sola disciplina científica que haya quedado fuera de juego. Ámbitos fundamentales como la física, la química, la ingeniería eléctrica, la biología molecular y la informática ocupan una posición idónea para realizar investigaciones, pero otras disciplinas como la ciencia de los materiales, la ingeniería química, la ingeniería ambiental, la bioingeniería, la investigación médica, la óptica y la fotónica encierran conocimientos que contribuyen al desarrollo de la nanotecnología, y en especial a su aplicación práctica. Hasta las ciencias sociales y humanas han experimentado un repentino aumento de propuestas y proyectos de investigación, sobre todo en los campos de la ética y el análisis de políticas.

La mayor parte de las actuales investigaciones en materia de nanotecnología no están motivadas por aplicaciones prácticas inmediatas -gran parte de ellas son exploratorias y experimentales, o están dedicadas a los tipos de caracterización e investigación minuciosa que constituyen la médula de toda ciencia. Si bien no escasean las propuestas relativas a sus posibles utilizaciones en el futuro, la nanotecnología, tal y como existe en 2006, se encuentra en una etapa de transición -las disciplinas tradicionales reconocen que está surgiendo una serie de problemas nuevos que tienen elementos en común con otras disciplinas afines y que, gracias a diversos instrumentos y técnicas innovadores, está apareciendo una generación de científicos capaces de estudiar y comprender fenómenos que sus predecesores no lograban desentrañar.

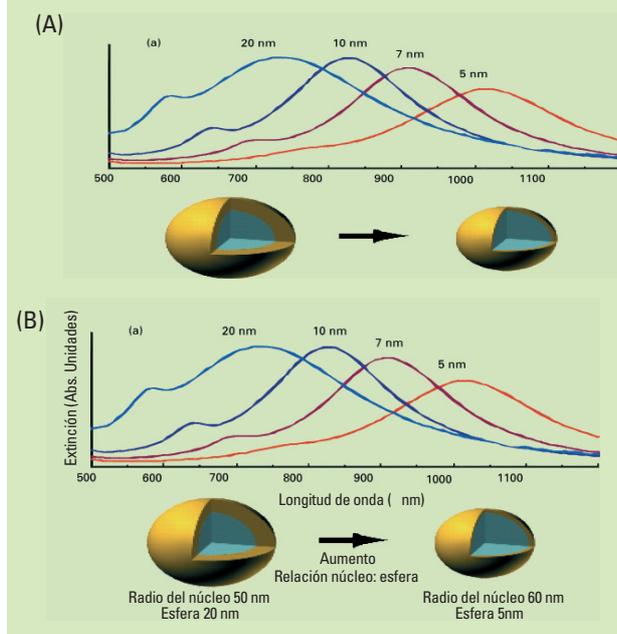
Entre otros ejemplos de este tipo de trabajos, cabe considerar el intento de utilizar la nanotecnología en la terapia contra el cáncer. Investigadores de diversos centros médicos y universidades del mundo utilizan “nanosferas de oro” y la luz visible normal para

destruir las células cancerosas. Las “nanosferas” son minúsculas gotas de cristal cubiertas de capas de oro de diferentes espesores. La absorción óptica del oro (la propiedad que le da su color amarillo cuando se observa a la luz del día) puede variar en función del espesor de esta capa, de modo que sólo algunas longitudes de ondas de luz son absorbidas mientras que otras son reflejadas. Los investigadores agregan a esas esferas anticuerpos específicos para combatir las células cancerosas, de modo que cuando se inyectan en el cuerpo de un ratón, se adhieren exclusivamente a dichas células, y no a las células sanas. Cuando la longitud de onda específica de la luz se irradia a través del cuerpo (mediante rayos ultravioletas en forma de láser de baja intensidad), esto eleva la temperatura de las nanosferas de oro -y exclusivamente de éstas- hasta un grado que permite destruir las células cancerosas circundantes. (Véase Figura 6.)

Pese a esas utilidades tan prometedoras e innovadoras, los científicos e ingenieros del ámbito universitario siguen realizando considerables esfuerzos para encontrar aplicaciones prácticas y establecer asociaciones y relaciones de colaboración con la industria y los gobiernos. Obviamente, esto confiere a las actuales investigaciones realizadas en el campo de la nanotecnología una orientación comercial hacia el mercado y los consumidores.

Aunque sólo se ha elaborado hasta la fecha un número limitado de productos (véase el Recuadro 2 basado en la lista de Forbes de los “10 mejores productos” en 2003 y 2004), es esencial comprender la importancia de este “afán de comercialización”. En efecto, si la utilización de nanomateriales y procesos de producción a nanoescala alcanza rápidamente la fase de madurez comercial, esto puede plantear nuevas problemáticas éticas y políticas y reavivar otras más antiguas. Muchas empresas se preocupan por la manera en que el público puede acoger nuevos productos y por su comprensión y percepción de la nanotecnología. Por supuesto, las motivaciones de la industria son interesadas, ya que

Figura 6: Nanosferas¹⁶



Las nanosferas de oro están compuestas por una nanopartícula dieléctrica cubierta de una fina capa de metal. Modificando las dimensiones relativas del núcleo y de la capa externa, se pueden concebir partículas que absorben la luz o la difunden en las zonas visibles y gran parte de las infrarrojas del espectro electromagnético. (A) Estos frascos contienen suspensiones de coloide de oro (a la extrema izquierda con su color rojo característico) o de nanosferas de oro con dimensiones variables de su núcleo y de su capa externa. (B) Las propiedades ópticas de las nanosferas fueron descritas por Mie en su teoría relativa a la dispersión de luz. Para un núcleo de un determinado tamaño, la formación de capas más finas incrementa la resonancia óptica hasta mayores longitudes de onda.

su objetivo consiste en fabricar productos atractivos, pero se basan también en la reciente experiencia de la polémica suscitada por los organismos y alimentos genéticamente modificados. Debido a la imagen actual de la ciencia, empañada por los problemas ligados a la energía nuclear, las catástrofes de Chernobyl y Bhopal, la controversia provocada por los alimentos genéticamente modificados, la encefalopatía esponjiforme bovina en el Reino Unido y la Unión Europea, así como el considerable aumento de las demandas por daños y perjuicios en los Estados Unidos, los especialistas en nanotecnología son

sumamente conscientes de la necesidad de estudiar las posibles utilidades y los eventuales efectos perjudiciales de esos productos mucho antes de su comercialización. Este reconocimiento y las medidas de precaución adoptadas en la investigación con fines comerciales son elementos novedosos.

Recuadro 2 Recientes productos comerciales derivados de la nanotecnología

- Cerax Nanowax para esquís sobre nieve
- Chaqueta de esquí impermeable de la marca Franz Ziener (fabricada con tela Nano Tex)
- Prendas de vestir con tratamiento nanocare resistentes a las manchas y las arrugas
- Crema cosmética con alto poder penetrante de L'Oréal
- Cámara OLED (diodos emisores de luz orgánica) de Kodak
- Gafas de sol de gran eficacia con revestimiento antirreflejo
- Filtro solar Z-COTE
- Raqueta de tenis Babolat con nanotubos
- Pelotas de tenis nanotecnológicas de InMat
- Calentador de pies Shock Doctor con aerogel
- Colchón de cama lavable Simmons (Nano Tex)
- Palos de golf Maruman & Co. fabricados con "fullerenos de titanio"
- Pelotas de golf de Nanodynamics
- "Cuidado personalizado de la piel" de Bionova
- Vendas para quemaduras fabricadas por Nucryst Pharmaceuticals con nanopartículas de plata
- Desinfectante de alta potencia EcoTrue producido por la empresa Envirosystems con nanopartículas emulsivas
- Atomizador Mincor (BASF) con agentes altamente hidrófobos, destinado a impermeabilizar materiales de construcción
- ClarityDefender, atomizador para limpiar cristales producido por la firma Nanofilm Technologies
- Pomada Flex Power para dolores musculares y de articulaciones (fabricada con liposomas de "90 nanómetros")
- Adhesivo dental de la marca 3M (nanohidroxiapatita)

¹⁶ La figura proviene de J. L. West y N. J. Halas, 2003. Engineered nanomaterials for biophotonics applications: Improving sensing, imaging and therapeutics. [Nanomateriales elaborados para aplicaciones biofotónicas: mejorar la detección, la formación de imágenes y las terapias.] *Annual Review of Biomedical Engineering*, Vol. 5, págs. 285-292.

Las repercusiones que esto puede tener en el plano internacional son obvias: al igual que en el caso de los alimentos genéticamente modificados, la falta de conocimiento de los efectos de la nanotecnología en cuanto a la salud y la seguridad puede dar lugar a restricciones, prohibiciones categóricas y conflictos internacionales complejos en torno a la producción y el transporte de tales materiales. Además de la exigencia por parte de organizaciones no gubernamentales, la sociedad civil y observadores internacionales de que se lleven a cabo más investigaciones, numerosas empresas consideran necesario intensificar las investigaciones sobre los efectos de la nanotecnología en materia de seguridad, toxicidad, salud y medio ambiente y, en cierta medida, sobre las cuestiones éticas y políticas relacionadas con los

productos de esta tecnología. El mundo empresarial muestra interés por la adopción voluntaria de normas, la formulación de normas internacionales y la creación en el plano internacional de prácticas idóneas de producción e ingeniería de materiales a nanoescala. Sin embargo, aún no se ha definido de manera adecuada un marco institucional y organizativo que permita abordar dichas cuestiones más allá de los intereses divergentes. Sin duda alguna, éste es un papel que la UNESCO y sus Estados Miembros pueden desempeñar, propiciando la elaboración de normas obligatorias y voluntarias relativas a la producción comercial, y fomentando la promulgación de normas éticas tanto para las prácticas de investigación con fines comerciales como para las investigaciones tradicionales del mundo universitario.

3

REPERCUSIONES ÉTICAS, JURÍDICAS Y POLÍTICAS DE LA NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología se utiliza en una amplia variedad de esferas científicas y técnicas; por consiguiente, tendrá repercusiones éticas, políticas y jurídicas en todas ellas. La nanotecnología va a interferir en distintas cuestiones de política actuales, o en dilemas éticos antiguos –pero va a tener también incidencias en nuevos problemas.

3.1 ASPECTOS INTERNACIONALES DE LA NANOTECNOLOGÍA

Si bien actualmente se está investigando sobre nanotecnología en todas partes del mundo, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, los niveles de financiación e inversión, las infraestructuras y materiales técnicos de que se dispone, y la cooperación entre sectores, son muy distintos. Tal como sucedió con avances anteriores de la ciencia y la tecnología, las naciones en desarrollo podrían quedar a la zaga y crearse así una “brecha cognitiva”, si no encuentran la manera de participar en pie de igualdad con los demás países. Pero hay cada vez más pruebas de que las características de esa brecha diferirán de las que hubiera cabido esperar 15 años atrás. A los científicos les es mucho más fácil consultar publicaciones por Internet y, vista la evolución económica de China, Brasil e India, es mucho más probable que investigadores de los Estados Unidos de América y la Unión Europea viajen a esos países, mantengan contactos y colaboren con sus especialistas. Por consiguiente, la nanotecnología pueden llegar a convertirse en un proyecto científico mucho más internacional que, por ejemplo, la investigación sobre la biotecnología en los decenios de 1980 y 1990. Si bien esto puede generar intereses nacionales opuestos, está claro que la naturaleza de la “brecha cognitiva” será de otra naturaleza.

Es muy posible que las desigualdades del acceso a la investigación sean mayores dentro de los países, que entre ellos. En las más altas instancias de la investigación y desarrollo, la comunicación entre expertos y élites de distintos países se ha tornado más fácil y habitual; pero la comunicación entre los expertos y élites de un país y los grupos más pobres y con menos estudios ha menguado y los incentivos para fomentarla han disminuido. Por consiguiente, es preciso que los científicos y expertos de la comunidad internacional encuentren la forma de reducir la “brecha cognitiva” tanto dentro de sus propias fronteras, como entre distintos países.

En qué medida las *especialidades* y *orientación* de las investigaciones sobre nanotecnología beneficiarán a todos los países por igual, es algo que está relacionado con el problema de la “brecha cognitiva”. Como se destaca en un artículo publicado en *PloS Medicine* en 2005¹⁷, en toda una serie de aspectos los resultados podrían ser mucho más beneficiosos para los países más pobres que cualquier logro comercial, por ejemplo, en lo referente al almacenamiento y la conversión de la energía, el tratamiento del agua, la salud, y el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades. En el artículo se sugiere, incluso,

¹⁷ Salamanca-Buentello, F., Persad, D.L., Court, E.B., Martín, D.K., Daar, A.S. y Singer, P.A. 2005. Nanotechnology and the developing world. *PloS Medicine*, Vol. 2, No. 5, e97, p. 302.

que las diez aplicaciones de la nanotecnología más prometedoras para los países en desarrollo también podrían contribuir al logro de los objetivos de desarrollo del Milenio determinados por las Naciones Unidas (véase la Figura 7).

Ahora bien, ¿cuáles son los mecanismos que deberían utilizarse para promover esas investigaciones? ¿qué incentivos, más allá de la mera viabilidad comercial, podrían proponerse a los científicos de las universidades y el sector privado a fin de alentarlos a perseguir

esos objetivos? La cooperación internacional puede contribuir a orientar la labor de los investigadores de las universidades y el sector privado hacia las esferas en las que se observan mayores necesidades o cabe esperarse mayores repercusiones. Muchos de esos ámbitos entrañan grandes posibilidades comerciales y de desarrollo, pero ha de contarse para ello con el compromiso de los países e interesados privados, a fin de, por un lado, alentar esas investigaciones y, por otro, utilizarlas en las distintas infraestructuras de los países en desarrollo.

Figura 7: Correspondencia entre las diez aplicaciones más prometedoras de la nanotecnología y los objetivos de desarrollo del Milenio (ODM)

Clasificación (Puntuación)	Aplicaciones de la nanotecnología	Ejemplos	ODM correspondiente
1 (766)*	Almacenamiento, producción y conversión de energía	Almacenamiento de hidrógeno mediante nuevos sistemas fabricados con nanotubos de carbono y otros nanomateriales ligeros Emisión de luz mediante células fotovoltaicas y dispositivos orgánicos que funcionan con puntos cuánticos Revestimientos compuestos para células solares fabricados con nanotubos de carbono Producción de hidrógeno mediante nanocatalizadores Membranas biomiméticas híbridas de proteínas y polímeros	VII
2 (706)	Mejora de la productividad agropecuaria	Riego lento y dosificación eficiente del agua y fertilizantes para cultivos, y de nutrientes y medicamentos para ganado mediante zeolitas nanoporosas Distribución de herbicidas mediante nanocápsulas Medición de la calidad de los suelos y el crecimiento de los cultivos con nanosensores Eliminación de los contaminantes de los suelos con nanoimanos	I, IV, V, VII
3 (682)	Tratamiento y saneamiento del agua	Purificación, desalinización y eliminación de los elementos tóxicos del agua mediante nanomembranas Detección de contaminantes y patógenos mediante nanosensores Purificación del agua mediante zeolitas, polímeros nanoporosos y arcillas atapulguitas Tratamiento y saneamiento del agua mediante nanopartículas magnéticas. Degradación catalítica de contaminantes del agua mediante nanopartículas de TiO ₂	I, IV, V, VII
4 (606)	Diagnóstico y detección de enfermedades	Sistemas de nanoanálisis (laboratorios miniaturizados) Nanosensores fabricados con tubos de carbono Diagnóstico de enfermedades mediante puntos cuánticos Nanosensores fabricados con nanopartículas magnéticas Conjugados de anticuerpos y dendrímeros para diagnóstico del VIH-1 y el cáncer Nanosensores fabricados con nanocables y nanocinturones para diagnóstico de enfermedades Mejora de las imágenes de control de enfermedades mediante nanopartículas	IV, V, VI
5 (558)	Sistemas de administración de medicamentos	Sistemas de dosificación lenta y continua de medicamentos mediante nanocápsulas, liposomas, dendrímeros, balones de Bucky (buckyballs), nanobioimanos y arcillas atapulguitas.	IV, V, VI
6 (472)	Procesamiento y conservación de alimentos	Películas de plástico para el revestimiento de envases alimentarios fabricadas con nanocompuestos Descontaminación de equipos de producción de alimentos, envases alimentarios y alimentos mediante nanoemulsiones antimicrobianas Identificación de contaminantes patógenos mediante nanobiosensores de detección de antígenos	I, IV, V
7 (410)	Purificación del aire contaminado	Degradación fotocatalítica de contaminantes del aire mediante la utilización de nanopartículas de TiO ₂ en sistemas autolimpiantes Aumento de la eficiencia, reducción del costo y mejora del control de los convertidores catalíticos mediante nanocatalizadores Detección de materias y escapes tóxicos mediante nanosensores Separación de gases mediante nanodispositivos	IV, V, VII
8 (366)	Construcción	Mejora de la resistencia del asfalto y cemento a las filtraciones de agua mediante estructuras nanomoleculares Bloqueo de las radiaciones ultravioletas e infrarrojas con nanomateriales resistentes al calor Utilización de nanomateriales para la construcción de viviendas y fabricación de superficies, revestimientos, adhesivos y cemento más económicos y que bloquean el calor y la luz Fabricación de superficies autolimpiantes (ventanas, espejos, baños, etc.) con revestimientos bioactivos	VII
9 (321)	Control de la salud	Utilización de nanotubos y nanopartículas para la fabricación de sensores de glucosa, CO ₂ y colesterol y el control <i>in situ</i> de la homeostasis	IV, V, VI
10 (258)	Detección y control de vectores y plagas	Detección de plagas mediante nanosensores Fabricación de nuevos pesticidas, insecticidas y repelentes de insectos con nanopartículas	IV, V, VI

* La puntuación máxima total que podía atribuirse a una aplicación era 819. DOI: 10.1371/journal.pmed.0020097.t001

3.2 TOXICIDAD Y REPERCUSIONES AMBIENTALES DE LA NANOTECNOLOGÍA

La toxicidad de los productos y los riesgos para las personas y el medio ambiente son los problemas más apremiantes que plantean las nanotecnologías a corto plazo. No son problemas de índole ética o política fundamentalmente, sino más bien de seguridad y salud. Sin embargo, habida cuenta de que las nanotecnologías se perciben como una novedad, las nuevas formas de peligro o los riesgos que puedan entrañar suscitan una mayor inquietud, y por lo tanto plantean nuevos interrogantes sobre la manera de afrontarlos. Para tratar este problema, la mayoría de las empresas y los investigadores practican la “gestión de riesgos”, una forma de evaluación sumamente técnica cuyo ámbito de aplicación es forzosamente reducido. Este método ofrece la ventaja de definir con precisión los riesgos –y a veces los efectos beneficiosos– de las sustancias, materiales y dispositivos creados recientemente, pero no aborda ninguna de las cuestiones de más vasto alcance relacionadas con la importancia ética o política de esos riesgos y no responde a ninguno de los interrogantes siguientes: ¿Quiénes van a asumirlos? ¿Cómo se van a repartir a nivel internacional? ¿Quiénes van a estar facultados para adoptar decisiones basadas en los análisis efectuados?

Hasta la fecha, no se han llevado a cabo muchos estudios sobre esos riesgos. En una serie de informes recientes, enumerados al final del presente documento, se dan más precisiones sobre el estado actual de las investigaciones. Los motivos de preocupación son dos: la peligrosidad de las nanopartículas y el riesgo de contaminación. El primero se refiere a los efectos biológicos y químicos de las nanopartículas en el cuerpo humano y los ecosistemas naturales, mientras que el segundo tiene que ver con los escapes de éstas, así como con su circulación y concentración, que pueden representar un peligro para los organismos o los ecosistemas.

Sólo algunas nuevas sustancias definidas como “nanopartículas” son susceptibles de experimentar una amplia difusión en un futuro próximo. Las que tienen más probabilidades de difundirse son las nanoestructuras a base de carbono, por ejemplo los “balones de Bucky” y los nanotubos de carbono con una o varias paredes. Es posible que otras sustancias –por ejemplo, el dióxido de titanio, el óxido de zinc o las nanopartículas de oro– se vayan a utilizar, o se estén utilizando ya, en diversos contextos. Lo mejor es clasificar esas sustancias en tres categorías: las nanopartículas “de ingeniería” (por ejemplo, los “balones de Bucky” y las nanosferas de oro), las nanopartículas “accidentales” (por ejemplo, las que se encuentran en los humos de soldadura, de cocina y de combustión de diesel) y las nanopartículas “de origen natural” (por ejemplo, las que se hallan en las brumas marinas y las combustiones producidas por la quema de bosques). Sólo las nanopartículas “de ingeniería” constituyen una categoría totalmente nueva y, hasta la fecha, las únicas que han sido objeto de un estudio serio son los “balones de Bucky”. En cambio, es obvio que las nanopartículas “accidentales” –denominadas a menudo “partículas ultrafinas”– como los gases de escape de los vehículos de motor se han estudiado mucho más a fondo. Los estudios realizados hasta ahora sobre la toxicidad de los fullerenos indican que son efectivamente sustancias peligrosas, aunque su nocividad se puede reducir mediante la adición de otros productos químicos en su superficie, cambiando así sus propiedades químicas.¹⁸ Las conclusiones de los estudios realizados inducen a pensar que lo que deben plantearse los encargados de elaborar reglamentaciones y políticas con respecto a las nanotecnologías no es tanto la cuestión de saber si éstas “son inocuas”, sino más bien la de “cómo lograr que sean más inocuas”. La cooperación y la coordinación internacionales pueden contribuir al

¹⁸ Se han llevado a cabo varios estudios sobre la toxicidad de los fullerenos. Uno de ellos ha mostrado los daños oxidativos que ocasionan en el cerebro de la lubina de boca ancha (Oberdörster, E. 2004. “Manufactured nanomaterials [fullerenes, C 60] induce oxidative stress in brain of juvenile largemouth bass”. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 112, No 10, págs. 1058-1062). Otro ha medido la citotoxicidad de los “balones de Bucky” en las ratas (Colvin, V. L. 2003. “The potential environmental impact of engineered nanomaterials”. *Nature Biotechnology*, Vol. 21, No 10, págs. 1166-1170).

establecimiento de unas normas éticas mínimas para la elaboración de esas sustancias y las pruebas a que han de someterse. Los científicos no sólo deberían hacer públicas la invención o creación de nanopartículas, sino también indicar cuáles son las condiciones necesarias para que su utilización sea inocua, o en todo caso más inocua que la de otros materiales usados para fines idénticos.

Las repercusiones ambientales y ecológicas de la nanotecnología pueden ser sumamente difíciles de evaluar. Debido a la complejidad natural de los ciclos ecológicos, así como a la imposibilidad de efectuar experimentos directos con el medio ambiente, se poseen escasos conocimientos sobre los peligros y riesgos de contaminación que las nanopartículas pueden entrañar para los ecosistemas. No obstante, en muchos casos lo más apremiante no es determinar la toxicidad exacta de las nanopartículas, sino elaborar nuevas reglamentaciones y aplicar las ya existentes a las industrias que elaboran y procesan estos nuevos materiales. En muchos países, el control de algunos productos químicos manifiestamente peligrosos como el arsénico y el mercurio es a todas luces insuficiente, y si se demuestra que las nanopartículas son aún más tóxicas que ellos, cabe suponer que a los encargados de elaborar las reglamentaciones se les va a plantear un problema importante. Las empresas que practican la llamada química verde y elaboran procedimientos de reciclaje y reutilización ocasionarán, naturalmente, menos riesgos de contaminación que las que no actúan así. Una vez dicho sea esto, cabe señalar que el establecimiento de incentivos para fomentar prácticas más costosas representa un problema de índole política muy anterior al planteado por las nanotecnologías.

La Unión Europea y los Estados Unidos cuentan con sistemas de reglamentación que permiten evaluar los peligros y los riesgos de contaminación de las nanotecnologías. La Comisión Europea ha publicado ya un informe preliminar sobre un procedimiento que permitiría afrontar esos riesgos. Además, el nuevo Reglamento de la Unión Europea relativo al Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Preparados químicos (REACH) va a tener repercusiones considerables en la industria química, así como consecuencias, hoy por hoy desconocidas, para los productores de nanopartículas¹⁹.

En los Estados Unidos, la Environmental Protection Agency (EPA), la *Food and Drug Administration* (FDA), la *Occupational Safety and Health Administration* y el *National Institute of Occupational Safety and Health* han empezado también a examinar si es necesario modificar los procedimientos existentes para tener en cuenta las nanotecnologías. Concretamente, la EPA está evaluando por primera vez un “preaviso de fabricación” presentado por una empresa que ha solicitado la aprobación reglamentaria para producir nanotubos de carbono. Además de cumplir con el mandato en materia de reglamentación que tienen encomendado, algunos de estos organismos estadounidenses están financiando proyectos de investigación internos o externos que tienen por objeto desentrañar los peligros y riesgos de contaminación de los nanomateriales de ingeniería.

En el Reino Unido, la *Royal Society* ha publicado recientemente un informe en el que se recomienda prever un periodo de dos a cinco años, durante el cual las empresas y las universidades tendrán que intensificar sus esfuerzos para investigar y llegar a conocer la toxicidad de las nanotecnologías y concebir procedimientos que permitan tratarla, antes de que el gobierno emprenda la elaboración de una nueva reglamentación en este ámbito.

La sensibilización del consumidor, el etiquetado de los productos y el establecimiento de normas y reglamentaciones relativas a las nanopartículas son cuestiones que guardan una relación obvia con la toxicidad. Hoy en día, una de las cuestiones esenciales relacionadas con la elaboración de cualquier tipo de producto científico o técnico es el grado de fiabilidad y credibilidad que los consumidores y los ciudadanos otorgan a la información que se les proporciona. Los alimentos genéticamente modificados son un ejemplo palmario –y un tanto alarmante– para la mayoría de las firmas interesadas por la realización de inversiones en las nanotecnologías. En efecto, la decisión adoptada por algunas empresas de producir y distribuir alimentos genéticamente modificados, sin haber tratado de obtener la aquiescencia del público y sin etiquetar con transparencia esos productos alimentarios, ha provocado reacciones muy vivas y suscitado debates sobre el etiquetado de los alimentos y la fiabilidad de los controles efectuados por los poderes públicos y las empresas privadas, así como sobre la garantía de inocuidad de los alimentos genéticamente modificados.

¹⁹ <http://europa.eu.int/comm/enterprise/reach/overview.htm> (fecha de la consulta del sitio: 17 de enero de 2006).

Las nanotecnologías tropiezan con problemas análogos, sobre todo cuando se recurre a escenarios como el de la “gelatina gris” para suscitar la conmoción o la persuasión. Aun cuando se haga abstracción de este tipo de alarmismo, el proceso normal de elaboración de informes sobre las repercusiones para la salud y sobre la inocuidad conduce a tantas advertencias y aprobaciones contradictorias –y a menudo incomprensibles– que va a ser muy difícil dar a conocer efectivamente los riesgos exactos que entrañan las nanopartículas, cualesquiera que éstos sean. Para complicar aún más la situación, todavía no se ha llegado a un consenso sobre la cuestión de saber si las nanopartículas o los nanomateriales deben tratarse como elementos totalmente nuevos, o como un subconjunto de materiales ya existentes, a efectos de su reglamentación y etiquetado. Los organismos de elaboración de normas encargados de la supervisión de estos materiales –desde las entidades nacionales de elaboración de normas hasta la Organización Internacional de Normalización (ISO)– van a tener que habérselas con el problema de determinar por qué –si es que así fuere– las nanopartículas son nuevas sustancias distintas de las estructuras más grandes que tienen la misma composición química. Sólo después de haberse resuelto esta cuestión, los encargados de las reglamentaciones podrán saber si deben perfec-

cionar los sistemas de reglamentación existentes o elaborar otros nuevos.

Si bien es verdad que, a escala nanométrica, se observa un comportamiento diferente en los materiales habituales, es posible que los sistemas existentes de evaluación de riesgos no puedan aprehender los nuevos riesgos potenciales. Las recomendaciones de los expertos europeos (véase el Recuadro 3) responden a algunos de los problemas suscitados en este ámbito, al pedir nuevos instrumentos, normas, nomenclaturas y sistemas de medición específicos con respecto a la escala nanométrica y los nuevos tipos de nanopartículas. Las organizaciones internacionales pueden desempeñar un papel importante si propician iniciativas de ese género y fomentan su difusión y adopción más amplias, sin circunscribirlas a los Estados Unidos y Europa y haciéndolas extensivas a algunas naciones en desarrollo como China, India, Brasil y la República Islámica del Irán, que están empezando a preparar planes de investigación relativos a las nanotecnologías, así como modalidades de reglamentación.

Este problema tiene un componente político y cultural: la actitud de los políticos y los ciudadanos con respecto al riesgo y la reglamentación. En la Figura 8,

Recuadro 3 Recomendaciones de los expertos europeos

1. Elaborar una nueva nomenclatura para los nanomateriales.
2. Asignar a las nuevas partículas un número de registro en el Servicio de Resúmenes de Sustancias Químicas (CAS).
3. Hacer progresar la ciencia, acopiando datos sobre las nuevas nanopartículas y efectuando análisis de éstas.
4. Elaborar nuevos instrumentos de medida.
5. Elaborar métodos normalizados de evaluación de riesgos.
6. Promover las mejores prácticas en la evaluación de riesgos.
7. Crear organismos encargados de controlar el desarrollo de las nanotecnologías.
8. Entablar el diálogo con el público y la industria.
9. Elaborar orientaciones y normas para la producción, manipulación y comercialización de los nanomateriales, así como para la evaluación de sus riesgos.
10. Revisar las reglamentaciones existentes y modificarlas cuando sea necesario, a fin de tener en cuenta las especificidades de las nanotecnologías.
11. Conseguir una contención máxima de las nanopartículas libres existentes.
12. Esforzarse por suprimir o reducir al máximo la liberación de nanopartículas en el medio ambiente, siempre y cuando sea posible.

²⁰ Figura proporcionada por Kristen Kulinowski del Center for Biological and Environmental Nanotechnology (todos los derechos reservados).

Figura 8 : Actitudes ante el riesgo²⁰

Reducir el riesgo al mínimo

Distintos grados de tolerancia del riesgo



Marco actual en los Estados Unidos:
la reglamentación vigente es satisfactoria.

Propuesta de la Comisión Europea:
exigir un enfoque progresivo de la evaluación de los riesgos.

se muestran las diferentes actitudes que pueden adoptarse sobre estas cuestiones. A la izquierda, se indica el enfoque de la reglamentación de la Unión Europea, más centrado en el principio de precaución, y a la derecha el de los Estados Unidos, más orientado hacia el mercado y la empresa. Según el enfoque centrado en la precaución, la falta de datos sobre la inocuidad o eficacia de las nanotecnologías constituye una advertencia para no comercializar los productos, mientras que para el enfoque centrado en el mercado esa ausencia de datos significa que no es necesaria ninguna reglamentación adicional antes de comercializar los productos.²¹

Habida cuenta de que la eficacia de la reglamentación nacional y de que la garantía de la inocuidad ha cobrado un aspecto más político y se ha hecho más problemática a causa de la mundialización, esa divergencia de enfoques resulta especialmente alarmante.

3.3 MÁS ALLÁ DE LA EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS

Las cuestiones relativas a la inocuidad, la toxicidad y las repercusiones en el medio ambiente son importantes, evidentemente, y exigen más investigaciones y una mayor vigilancia internacional. Pese a todo, constituyen problemas técnicos de alcance relativamente limitado y la mejor manera de resolverlos estriba en utilizar técnicas perfeccionadas de análisis de riesgos, llevar a cabo experimentos científicos y efectuar una reevaluación jurídica de los sistemas de reglamentación existentes.

Sin embargo, hay otras cuestiones que no se pueden abordar exclusivamente desde el punto de vista técnico del análisis de riesgos. Entre esas cuestiones –que son de índole ética y política y tienen, por lo tanto, un alcance más vasto– figuran la propiedad intelectual, la confidencialidad y la legitimidad de los resultados científicos, así como el riesgo de que se produzca una “brecha cognitiva” inducida por la financiación y las implicaciones jurídicas de la propiedad intelectual. En un plano más general, de lo que se trata es de saber si la nanotecnología, en

cuanto ciencia, se asemejará a la ciencia de antaño y utilizará sus mismos procedimientos, o si se transformará en algo menos habitual a causa de las presiones políticas, sociales y jurídicas que puedan surgir.

Las recientes investigaciones sobre las biotecnologías y los alimentos genéticamente modificados han venido a representar una cierta “pérdida de inocencia” con respecto a la pureza e imparcialidad de la ciencia. El hecho de que la investigación científica fundamental esté abiertamente reglamentada y se halle socialmente orientada no parece representar ningún tabú para muchas naciones, y con las nanotecnologías podría darse por primera vez el caso de que los propios científicos no estuviesen ya en condiciones de dirigir la investigación científica de manera autónoma debido al incremento de las presiones externas que puedan emanar no sólo de los medios comerciales, sino también de la sociedad civil y del Estado. El resultado de esta nueva interacción dista mucho de ser evidente.

²¹ Con respecto al enfoque basado en el principio de precaución, véase también el informe elaborado por la Comisión de Ética del Conocimiento Científico y la Tecnología (COMEST), titulado Informe del Grupo de expertos sobre el Principio Precautorio (UNESCO, 2005).

3.4 ÉTICA DE LA CIENCIA

Una de las cuestiones más preocupantes suscitadas por la nanotecnología es la que se refiere a la propia estructura de la ciencia, aunque este problema no se circunscribe exclusivamente al ámbito de la nanotecnología. La problemática gira en torno a la legitimidad de los resultados científicos, el crédito que les otorga el público y el uso y abuso que de ellos hacen tanto los poderes públicos como las empresas y las entidades sin fines de lucro. En el siglo XX, la ciencia se ha visto sometida a nuevas formas de control y presión en lo que respecta a la producción, publicación e intercambio de información científica. La primera de esas formas es, evidentemente, la ampliación del sistema de los derechos de propiedad y sus remuneraciones. La segunda la constituyen la creciente vigilancia de la investigación científica por parte del público y la exigencia de que ésta rinda cuentas a la sociedad. La tercera es el uso y abuso de la información científica por parte de los gobiernos en un contexto de acrecentamiento de la confidencialidad y de actividades antiterroristas desconocidas hasta ahora. Al unirse todas estas formas de presión, pueden tener repercusiones negativas sobre la índole y calidad de la labor científica realizada y también pueden dar lugar a que surjan incentivos contrarios a los valores de objetividad y desinterés propios de la ciencia.

Además, debido en gran parte a la internacionalización constante de la investigación científica y al desarrollo de las redes que la alimentan y se nutren de ella, últimamente resulta difícil saber a quiénes va a beneficiar ésta y quiénes van a ser víctimas de los peligros que pueda entrañar. Una ciencia de buena calidad necesita infraestructuras sólidas para poder realizar su gestión; y la carencia de esas infraestructuras en los países desarrollados podría privarles de las prácticas y los conocimientos científicos mejores y más fiables, ya sea porque no disponen de recursos financieros suficientes para adquirir información científica de primera calidad, o porque no tienen acceso a los datos y documentos científicos archivados digitalmente. La “brecha digital” y los problemas que plantea el control estratégico de las redes por parte de determinados países podrían tener una repercusión en las formas de conocimiento sobre las nanotecnologías difundidas a nivel mundial.

Como ocurre en los casos de peligros y riesgos de contaminación, el mayor problema con que tropezamos es que no disponemos de muchos

conocimientos sobre los riesgos y las ventajas de la propiedad intelectual. En efecto, no se dispone prácticamente de datos empíricos que demuestren la eficacia (económica) de un reforzamiento de la protección de las patentes o del derecho de autor, o que prueben que una disminución de esa protección pueda ser beneficiosa. No obstante, podemos examinar otros ámbitos de la ciencia y la propiedad intelectual para obtener algunas indicaciones con respecto a la nanotecnología.

Tres tipos de controversias han creado recientemente una gran confusión en lo que respecta a la utilización de la propiedad intelectual en el campo de la ciencia y del comercio basado en ésta. La primera se refiere a una concesión ultraliberal de patentes, que puede conducir no sólo a un aumento de los costos de los litigios ante los tribunales, sino también a la creación de sistemas sumamente complicados de concesión de licencias recíprocas y de comercio de patentes entre las empresas y los poderes públicos. La segunda guarda relación con las nuevas legislaciones relativas a las bases de datos, que confieren efectivamente a determinadas empresas una serie de derechos sobre hechos, a lo cual se habían opuesto formalmente los sistemas de propiedad intelectual del mundo entero durante mucho tiempo, ya que esto puede limitar incluso la investigación fundamental más inofensiva al crear costos prohibitivos. La tercera controversia versa sobre las patentes denominadas “de métodos comerciales” en el campo de las tecnologías de la información.

Estas últimas patentes son una buena muestra del expansionismo desmesurado de la propiedad intelectual. Consisten esencialmente en otorgar amplios derechos a las empresas que utilizan la informática para establecer procesos ya existentes. Dos ejemplos sobradamente conocidos son las patentes relativas a las subastas y las compras en línea. En el caso de las nanotecnologías también podría producirse este mismo fenómeno de tratar de conseguir patentes a toda costa, habida cuenta de que, por definición, “explotan nuevas propiedades” de materiales sobradamente conocidos.

Una concesión excesiva de patentes en el ámbito de las nanotecnologías entrañaría el riesgo de desembocar en una “maraña de patentes”, o en lo que podríamos llamar la “tragedia del coto cerrado”. Las

patentes de las nanopartículas básicas y de los procedimientos que las utilizan podrían llegar a ser tan detalladas y complejas que la capacidad para crear un material nuevo –por ejemplo, un sistema de filtración de agua que utiliza nanotubos de carbono para producir agua potable– tropezaría con toda una maraña inextricable de patentes competidoras y duplicadas. En estas condiciones, es necesario contar con un dictamen jurídico, incluso antes de empezar la investigación, y esto no sólo pone en peligro los intereses comerciales, sino también los de las universidades y centros académicos. En vez de estimular las remuneraciones, esa complejidad provoca inquietudes con respecto a la legalidad de la utilización de elementos que se pueden considerar productos de la naturaleza o procedimientos naturales. Las consecuencias de todo esto serían escalofrantes, ya que sólo los más pudientes podrían acceder a determinados tipos de investigaciones.

Esas consecuencias son aún más escalofrantes cuando lo que se hace objeto de protección no son necesariamente procedimientos o dispositivos, sino la información científica propiamente dicha, por ejemplo la utilización de secuencias génicas, la información existente en una base de datos u otras aportaciones esenciales –aunque inmateriales– al proceso científico. En ese caso, se podrían exigir derechos y contratos de licencia incluso para la utilización de información relativa a los productos a escala nanométrica. El hecho de que los países en desarrollo puedan tener o concebir sus propias leyes de propiedad intelectual no les exime de estos problemas. Algunos organismos internacionales como la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) y la Organización Mundial del Comercio (OMC), así como una serie de grupos industriales cuyos ingresos comerciales provienen exclusivamente de la explotación de la propiedad intelectual –por ejemplo, la industria cinematográfica y la fonográfica– han batallado duramente a lo largo del último decenio para armonizar y reforzar las leyes de la propiedad intelectual en casi todas las partes del mundo.

Este problema se puede solucionar alentando –y, entre los gobiernos nacionales, exigiendo– un acceso libre a los resultados y materiales de la investigación financiada con fondos públicos. En el mejor de los casos, la tendencia actual a reforzar cada vez más la protección de la propiedad intelectual ocasionará gastos de transacción considerables debido a la complejidad que crea, y en el peor de los casos sofocará literalmente la capacidad de los científicos para llevar a cabo trabajos de investigación de manera independiente

y verificar sus hipótesis. Es fácil crear incentivos, pero en el campo de la propiedad intelectual es muy difícil volver atrás cuando se ha llegado a un callejón sin salida. Aunque el sistema de patentes no puede reemplazar adecuadamente el examen efectuado por los pares y la reproducción de los trabajos científicos, se impulsa a los científicos a efectuar investigaciones nuevas y patentables, en vez de orientarlos hacia la obtención de resultados fiables y reproducibles o la realización de pruebas experimentales claras y de alcance general que pueden tener pocas aplicaciones prácticas. Ante todo, lo que se necesita es una amplia difusión de los datos conservados en archivos de libre acceso que contienen los resultados de las investigaciones financiadas con fondos públicos. Esa difusión no debe hacerse exclusivamente en formato electrónico, sino también mediante documentos impresos en los países donde el acceso a Internet es intermitente o poco fiable. También es sumamente necesario que se difundan nuevas reglas aplicables a los científicos cuyas actividades se financian con fondos públicos. Esas reglas deben incitarles a publicar sus trabajos antes de que traten de conseguir un título de propiedad intelectual. Un sistema científico abierto, fiable y reproducible solo se puede mantener incitando a los científicos a trabajar en interés del público del mundo entero.

El segundo tipo de presiones que se ejercen sobre la ciencia se debe al control cada vez mayor de la investigación y los resultados científicos por parte del público. Una serie de acontecimientos importantes –la controversia de Asilomar acerca de la invención de la recombinación de las moléculas de ADN, las catástrofes de Chernobyl y Bhopal, la crisis provocada por la encefalopatía esponjosa bovina (EEB) y la polémica pública en Europa acerca de los alimentos genéticamente modificados– han hecho que los gobiernos y el público se muestren recelosos ante las declaraciones de los científicos. Sin embargo, este mismo motivo ha hecho que la investigación científica sea cada vez más sensible a las exigencias de la sociedad y el público. Dos buenos ejemplos de esto son: las presiones ejercidas por los militantes contra el sida para que se intensifiquen las investigaciones médicas sobre esta enfermedad; y el éxito cosechado por los ecologistas, que han conseguido establecer y mantener la protección de hábitats de especies vegetales y animales amenazadas frente a las exigencias de la pesca y la agricultura. Con frecuencia, los intereses de las grandes empresas intervienen en el surgimiento de estas nuevas formas de interacción entre los científicos y el público. En el caso de las nanotecnologías, en particular, se experimenta más que nunca la necesidad de que el público participe

con mayor antelación y frecuencia para evitar las reacciones hostiles que ha provocado la introducción de los alimentos genéticamente modificados.

Los organismos internacionales como la UNESCO pueden servir de mediadores eficaces en ese diálogo entre el público y los científicos, o propiciarlo. Si la investigación relativa a la nanotecnología debe tener por objetivo social la solución de los problemas más apremiantes para la gran mayoría de las personas, es necesario entonces que haya personas e instituciones capaces de establecer un nexo entre los científicos, los proveedores de fondos y los empresarios que buscan soluciones a esos problemas, por un lado, y los expertos locales y especialistas en ámbitos distintos de las nanotecnologías –por ejemplo, en descontaminación del medio ambiente o en políticas relativas a los recursos hídricos y/o la energía en los países en desarrollo–, por otro lado.

El tercer tipo de presiones que se ejercen sobre la ciencia es mucho menos claro. Son las relacionadas con la confidencialidad y la amenaza terrorista. Las inquietudes que se manifiestan en este ámbito son dos. La primera es el temor de que la investigación relativa a la nanotecnología, aun cuando se trate de una investigación fundamental, pueda ser utilizada por los terroristas para crear nuevos tipos de armas nefastas, o que armas de este tipo

fabricadas por los gobiernos de algunos países puedan caer en manos de los terroristas. Este temor es el que incita a ejercer presiones para clasificar como confidenciales o mantener secretos muchos trabajos de investigación sobre la nanotecnología, y también sobre las biotecnologías o la química. La segunda inquietud es de signo contrario, esto es, el temor a que los gobiernos utilicen abusivamente la amenaza del terrorismo para clasificar como secretos algunos trabajos de investigación, o –lo que es más probable– para desestimar resultados científicos que consideren incompatibles con sus objetivos políticos. En este segundo caso, el problema no estriba tanto en los objetivos particulares de los gobiernos, sino en la legitimidad de los resultados científicos y la separación efectiva de la ciencia y de los intereses gubernamentales. Cuanto menos nítida sea esa separación, menos posibilidades tendrá la ciencia –incluso la de mejor calidad– de mostrar su legitimidad y desinterés a la opinión pública nacional e internacional. A este respecto, las organizaciones internacionales pueden desempeñar una vez más un papel importante para contribuir a la definición de nuevas normas de conducta en el plano científico, susceptibles de conciliar la necesidad evidente de libertad para la ciencia con las presiones políticas que se ejercen para no divulgar información potencialmente peligrosa.

3.5 DESVIACIONES DEL DEBATE — CUESTIONES ÉTICAS QUE NO SON TALES

Se ha prestado recientemente una gran atención a dos aspectos del debate sobre las repercusiones y los riesgos de las nanotecnologías en el plano ético y social: el escenario de la llamada “gelatina gris” y las preocupaciones acerca del “posthumanismo”. El escenario de la “gelatina gris” se basa en el temor a que los dispositivos nanotecnológicos se programen para su reproducción, o a que “evolucionen” convirtiéndose en dispositivos capaces de reproducirse y, por consiguiente, de destruir el universo natural. Hoy en día, no hay ningún objeto nanotecnológico que sea capaz de autorreproducirse, salvo si se considera que objetos como el ADN y los virus entran dentro de la definición de las nanotecnologías, lo cual embrolla el debate aún más. Sin embargo, algunos filósofos, especialistas en ética y científicos

suelen hablar como si esos objetos ya existieran o estuviesen a punto de existir. Sus argumentos emanan de una especie de “determinismo tecnológico” que hace que tanto los partidarios como los adversarios de las nanotecnologías den por sentado que la tecnología se desarrolla de forma autónoma y queda fuera del alcance de todo control humano, social o estatal. A falta de experimentos científicos en este ámbito, el debate se polariza rápidamente: o se está a favor de la nanotecnología, o se está en contra de ella.

El escenario de la “gelatina gris” desvía el debate sobre las cuestiones éticas y sociales porque impele a centrarlo en los peligros y las posibilidades técnicas de la investigación del mañana, en vez de exa-

minar el sistema real de control y reglamentación de la investigación que existe hoy en día. Como los medios para protegerse contra la “gelatina gris” son tan hipotéticos como el propio escenario, se desvía la atención de las prácticas actuales de la ciencia y la tecnología, así como de la necesidad de ejercer un control cuidadoso y entablar un debate que trate de los problemas y prácticas vigentes, y no de escenarios futuros de carácter imaginario.

La cuestión del “posthumanismo” desvía el debate de forma análoga. En este caso, la discusión gira en torno a las distintas utilidades de las nanotecnologías para mejorar, corregir, sustituir o desarrollar las características del ser humano. Esas utilidades van desde los nanosensores que se pueden implantar en la retina para agudizar la vista hasta los implantes cocleares que mejoran la audición, pasando por las tecnologías destinadas a mejorar el rendimiento de los deportistas o las nuevas formas de cirugía estética.

El debate sobre el “posthumanismo” suscita un problema inverso al planteado por el escenario de la “gelatina gris”. En efecto, parte de la hipótesis de que las nanotecnologías van a plantearnos en el futuro una serie de dilemas éticos y tenemos que estar preparados para afrontarlos, cuando de hecho esos dilemas son ya cuestiones de plena actualidad: dopaje en el deporte, pruebas genéticas, o problemas de confidencialidad suscitados por la gestión de las tecnologías de la información implantadas en el cuerpo humano. La presencia de las nanotecnologías debe, por lo menos, representar una ocasión no sólo para actualizar nuestro enfoque sobre esas cuestiones, sino también para tratar de aportar respuestas concretas a los problemas actuales y futuros en este ámbito. La UNESCO ya ha publicado algunos análisis (por ejemplo, *La Clonación humana: cuestiones éticas*) que podrían aplicarse con leves

modificaciones a la mejora del ser humano gracias a la nanotecnología.

Si se lograra convencer a los encargados de la elaboración de políticas, las personas elegidas y designadas para desempeñar cargos públicos, las organizaciones no gubernamentales y los grupos de presión de que esos dos enfoques desvían el debate de su verdadero objeto, entonces podrían todos ellos entablar una discusión seria sobre una serie de cuestiones apremiantes y nuevas formas de control en el plano de las políticas y las reglamentaciones. Entre esas cuestiones figuran las siguientes: la toxicidad, los peligros para el medio ambiente, los riesgos de contaminación, el etiquetado de productos, la sensibilización de los consumidores, la reglamentación de productos, la propiedad intelectual, la confidencialidad de la información, la fiabilidad y legitimidad de la investigación científica, el riesgo de “brecha científica y técnica” a nivel mundial y, sobre todo, la promoción de aquellos usos de las nanotecnologías que puedan contribuir a satisfacer las necesidades más apremiantes de la mayoría de las personas.

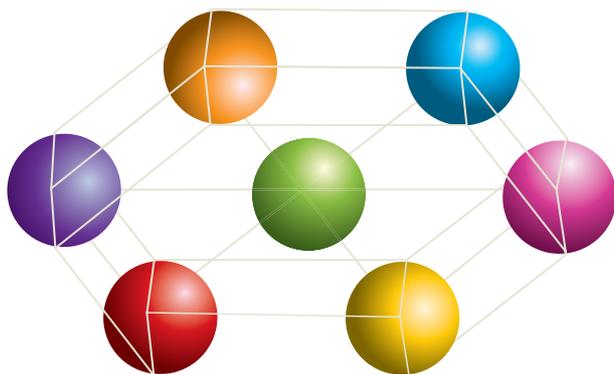
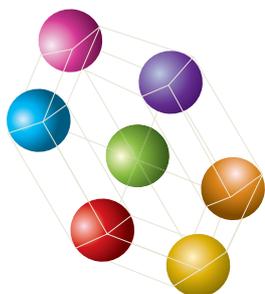
Como muchas de estas cuestiones ya se tratan en otros debates sobre ética y políticas ya en curso, es preferible que se incluyan en éstos, en vez de partir de cero. Por ejemplo, las cuestiones relativas a la propiedad intelectual se están tratando ya ampliamente en los debates sobre las biotecnologías y la tecnología de la información. Asimismo, los debates sobre ética médica abarcan ya los problemas de la mejora genética, el riesgo médico y la utilización de seres humanos en los trabajos de investigación. Aunque las nanotecnologías son nuevas y apasionantes, los problemas que suscitan en el plano de la ética y las políticas no difieren radicalmente de los que tenemos que afrontar actualmente. Sin embargo, pueden ofrecer la posibilidad de tratarlos con más acierto que nunca.

4

CONCLUSIÓN

La nanotecnología se halla en una encrucijada. El surgimiento de un consenso relativo a su dirección, inocuidad, interés y financiación dependerá de cómo se definan y de quiénes vayan a ser, por consiguiente, las partes interesadas. Habida cuenta de que nuestro mundo es cada vez más tributario de la ciencia y la tecnología, y de que se da una creciente sensibilización del público a los peligros y posibilidades que ambas entrañan, se puede afirmar con seguridad que la participación de partes interesadas de toda índole va a “alcanzar” el centro medular del propio quehacer científico.

Además, la gran atención y el interés entusiasta de que dan muestras grupos muy diversos –desde los poderes públicos hasta las organizaciones sin fines de lucro, y desde las empresas hasta las agrupaciones de militantes– van a exigir también una coordinación concertada. Es obvio que ya son suficientemente numerosas las personas que desean actuar en este ámbito y que está disminuyendo la necesidad de crear nuevas instituciones, organismos o grupos distintos, mientras que se hace cada vez más apremiante la tarea de reforzar los que ya existen.



Índice de informes sobre las nanotecnologías

En este índice se enumeran los informes publicados recientemente sobre las nanotecnologías y sus repercusiones en el plano social, político y ético.

- **Comisión Europea – Dirección General de Sanidad y Protección de los Consumidores**
“Nanotechnologies: A preliminary risk analysis on the basis of a workshop organized in Brussels on 1–2 march 2004 by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission”
1-2 de marzo de 2004
http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm
- **Demos**
“See Through Science”
<http://www.demos.co.uk/catalogue/paddlingupstream>
- **NSF/Meridian Institute International**
“‘Nanodialogues’ on Risk, Nanotechnology and the Poor and Regulation”
<http://www.nanodialogues.org>
- **NSF NBIC Report**
“Converging Technologies for Improving Human Performance”
<http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies>
- **National Research Council**
“Small Wonders, Endless Frontiers, a Review of the National Nanotechnology Initiative” (2002)
<http://www.nap.edu/openbook/0309084547/html/1.html>
- **Swiss Re Report**
“Nanotechnology – small matter, many unknowns”
<http://www.swissre.com/INTERNET/pwswpspr.nsf/alldocbyidkeylu/ULUR-5YAFFS>
- **The Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC)**
“The Big Down”
<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>
“Down on the Farm”
http://www.etcgroup.org/documents/ETC_DOTFarm2004.pdf
<http://www.etcgroup.org/article.asp?newsid=485>
- **UK Nanojury 2005**
<http://www.nanojury.org>
- **UK Royal Society and Royal Academy of Engineers Report**
“Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties”
<http://www.nanotec.org.u>
- **Woodrow Wilson Report**
“Nanotechnology and Regulation: The case of the TSCA”
<http://nanotechcongress.com/Nanotech-Regulation.pdf>

La División de Ética de la Ciencia y la Tecnología de la UNESCO

La existencia de una División de Ética de la Ciencia y la Tecnología es una manifestación de la importancia primordial que atribuye la UNESCO a la ética de la ciencia y la tecnología, y en particular a la bioética. Uno de los objetivos de la Estrategia a Plazo Medio de la Organización es “promover principios y normas éticas que orienten el desarrollo científico y tecnológico y las transformaciones sociales.”

Las actividades de la División comprenden el apoyo a los Estados Miembros de la UNESCO que tienen la intención de llevar a cabo actividades en el ámbito de la ética de la ciencia y la tecnología, como por ejemplo preparación de programas de enseñanza, creación de comités nacionales de ética, organización de conferencias y creación de Cátedras UNESCO.

La División se encarga además de la de las funciones de secretaría de tres órganos internacionales dedicados a temas éticos: la Comisión Mundial de Ética del Conocimiento Científico y la Tecnología (COMEST), el Comité Internacional de Bioética (CIB) y Comité Intergubernamental de Bioética (CIGB).

UNESCO

División de Ética de la Ciencia y la Tecnología

Sector de Ciencias Sociales y Humanas

1, rue Miollis

75732 Paris Cedex 15

France

<http://www.unesco.org/shs/ethics>

