

Nanotecnología, ¿un camino hacia el desarrollo?

Entrevista a Gian Carlo Delgado

Karell Valdiviés

Investigador. Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad de La Habana.

Aylee Ibáñez

Historiadora del Arte. Casa del Festival del Nuevo Cine Latinoamericano.

La humanidad ha arribado al presente siglo con grandes expectativas en el desarrollo científico-técnico. Ya se fabrican circuitos integrados que se introducen en nuestros tejidos para regular algunas de las funciones biológicas; materiales más resistentes a las altas temperaturas, menos frágiles, con propiedades lubricantes especiales, o capaces de filtrar los rayos ultravioletas nocivos para la piel; radio-receptores del tamaño de un reloj de pulsera, etc. Estos ejemplos entran en el campo de la nanotecnología, la cual se ha dado en llamar la Revolución científico-técnica del siglo XXI, y representa una nueva rama interdisciplinaria, que toma conceptos de la física, la química y la biología y se ocupa de desarrollar e implementar una gran variedad de materiales y dispositivos que tienen en común sus dimensiones nanométricas.

Ya en 1959, el Premio Nobel de Física, Richard Feynman, en una famosa conferencia ante la American Physical Society titulada «Hay suficiente espacio en el fondo», había especulado sobre los beneficios que supondría para la sociedad la posibilidad de manipular la materia y fabricar artefactos con las dimensiones de unos pocos átomos. Años más tarde, en 1974, Nomo Taniguchi introdujo el término nanotecnología, relacionado con la fabricación de productos mediante métodos mecanizados. Mostró cómo el aumento en la precisión alcanzaba el punto en

que las piezas fabricadas tuvieran dimensiones nanométricas. Actualmente, este procedimiento se denomina «de arriba hacia abajo» e implica un gran consumo de energía externa.

Hoy en día, la miniaturización a partir de los procedimientos convencionales ha llegado prácticamente a su límite. Para perfeccionarla ha sido necesario emprender el camino contrario; o sea, ir «de abajo hacia arriba», a partir de moléculas. Al aplicar este principio, se puede aprovechar la energía interna de las moléculas para que se asocien entre sí. Esa es la esencia de la nanotecnología: construir dispositivos pequeños mediante la obtención de moléculas, de modo que estos sean cada vez más sensibles y precisos. Los utilizados en nanotecnología deben medir entre 1 y 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), una dimensión imperceptible para el ojo humano. Para identificar mejor lo que corresponde a un nanómetro es bueno saber que un cabello humano es de unos 10 000-15 000 nm de grosor. Trabajar a niveles nanométricos significa controlar y manipular la materia a escala de átomos y moléculas.

De modo general, entre las aplicaciones más prometedoras de la nanotecnología se encuentran: almacenamiento, producción y conversión de energía; producción agrícola, eliminación de la contaminación ambiental, diagnóstico de enfermedades, sistemas de administración de fármacos, procesamiento de alimentos,

construcción, monitorización de la salud, detección y control de plagas, informática, alimentos transgénicos, entre otras.

Por otra parte, la nanotecnología también implica riesgos que amenazan con romper con los valores económicos, políticos, ambientales y éticos que imperan en nuestra sociedad. Por ello debemos centrar nuestra atención en minimizar estos impactos, de modo que se puedan evitar conflictos y se propicie una aplicación controlada y ordenada de los avances de esta novedosa rama de las ciencias naturales.

Entre los temas actuales de debate en nanotecnología se encuentran: la necesidad de proteger el medio ambiente, el problema energético y la dependencia mundial de los hidrocarburos y otros combustibles fósiles, la protección del conocimiento, el desarrollo de la industria armamentista, etc. Estos avances tecnológicos han servido para hacer aún más insalvable la diferencia entre los países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo, pues quien domine la nanotecnología puede producir determinado material en su laboratorio en lugar de importarlo de otro país. Resulta necesario, por tanto, incentivar iniciativas que favorezcan la inserción de los países del Tercer mundo en la nanotecnología, y así contribuir al desarrollo. Para materializar esta meta es importante establecer bases legales, y potenciar un pensamiento que garantice la capacidad de gestionar los productos de la innovación y los conflictos que puedan aparecer entre los nuevos logros y la sociedad que los introduce.

El doctor Gian Carlo Delgado Ramos, investigador del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), accedió a una entrevista sobre los múltiples impactos legales, ambientales, éticos y sociales que trae aparejado el desarrollo de la nanotecnología. Gian Carlo es también integrante del Sistema Nacional de Investigadores de México, coeditor de la revista Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, coordinador del Laboratorio Socio-económico en Nanotecnología (LABnano) y autor de varios libros y de numerosos artículos.

A lo largo de la historia han tenido lugar disímiles revoluciones tecnocientíficas, ¿cuál es la peculiaridad de la nanotecnológica con respecto a otras como la de la información y la biotecnológica?

La nanotecnología permite, por un lado, manipular la materia, orgánica e inorgánica, a escalas propias de los átomos; lo que, en principio, posibilitará hacerlo con todo lo que nos rodea; de ahí que las implicaciones serán enormes. Por otro lado, está permitiendo generar sinergias con distintas disciplinas, no solo de las ciencias naturales, exactas o de las ingenierías. El desarrollo de la nanotecnología requiere cruces con disciplinas diversas, incluyendo las de las ciencias sociales y las humanidades.

Por tanto, tal vez no es exagerado decir que podría tratarse de una tecnología que revolucionará la manera de transformar la naturaleza y de producir mercancías y servicios. Como toda tecnología, su impacto puede tener implicaciones negativas y no todos los beneficios

serán accesibles para el grueso de la población; por lo menos en largo tiempo.

Ya se habla de que los materiales nanoestructurados son utilizados en productos de lujo como bolas de tenis, golf o boliche; en la fabricación de neumáticos de alto rendimiento, o de telas con propiedades antimanchas/antiarrugas; en cosméticos, fármacos y nuevos tratamientos terapéuticos; en filtros/membranas para potabilizar agua, entre otras «remediaciones» medioambientales; en la mejora de procesos productivos mediante la introducción de materiales más resistentes o eficientes (tanto industriales como agroindustriales); o en el diseño de nuevos materiales para usos que van desde la electrónica, la aeronáutica y prácticamente toda la industria del transporte, hasta detectores de armas químico-biológicas o para la fabricación de otras más sofisticadas (por ejemplo, más ligeras, de mayor potencia).

¿Qué repercusiones tienen, para la sociedad contemporánea, los cambios que se están evidenciando en el campo de la nanotecnología? ¿Qué problemas potenciales pueden surgir?

Por un lado, como dije, se observan amplios beneficios que posibilitarían la potencial reestructuración, en principio, del mundo material que nos rodea. Y por otro, se advierten algunas implicaciones que esa transformación tendría en el medio ambiente y, de ahí, en la salud, puesto que estarían presentes novedosas nanoestructuras diseñadas por el ser humano (no generadas naturalmente), y cuyas características, en su gran mayoría, son todavía desconocidas.

Existe un alto grado de incertidumbre sobre los potenciales riesgos de las nano-innovaciones. Como se sabe, el Principio de Heisenberg y el consiguiente debate entre Albert Einstein y Niels Bohr (la denominada Interpretación de Copenhague)¹ muestran límites relativos sobre lo que se puede medir; que, en principio, varias propiedades de las partículas subatómicas no pueden estar definidas con «exactitud» de modo simultáneo. A este tenor, hoy en día se reconoce, en la arena de los nanotecnólogos, las limitaciones u obstáculos en la caracterización interna de las nanoestructuras (o nanomódulos), en la manipulación simultánea de varios átomos, en el entendimiento del comportamiento colectivo de los nanosistemas o en el diseño de mecanismos de ensamblaje de nuevas formas arquitectónicas de nanocomponentes útiles para el desarrollo de nuevos nanosistemas, entre otros aspectos. Por ello, se puede dilucidar que los potenciales riesgos son probables, y más aún, en múltiples casos, difíciles de detectar de modo inmediato, puesto que lo que se está manipulando es directamente imperceptible a nuestros sentidos. Ello genera una «desconexión» entre las causas y los efectos del avance de las nanotecnologías, tanto en el tiempo como en el espacio, lo que complejiza su

manejo. Tal situación está empujando el estímulo a la investigación ecotoxicológica de los nanomateriales y al desarrollo de dispositivos —portables y fiables— para la detección de nanoestructuras.

Entre los riesgos e implicaciones indicados, incluso de fuerte tinte ético-moral, están los siguientes: que las nanoestructuras pueden ser altamente tóxicas y, por tanto, causar reacciones alérgicas, intoxicación, y eventualmente alteración irreversible y/o la muerte del ser humano y de otras formas de vida, con consecuencias impredecibles; que los beneficios del acelerado avance de las nanotecnologías no necesariamente llegarán a la gran mayoría de la población, carente de medios económicos; que sus aplicaciones militares afectarán, potencialmente, los derechos humanos, al transformar la naturaleza de la guerra, las operaciones clandestinas, así como los operativos de contrainsurgencia; o que el actual avance de esta tecnología, a la par de la biotecnológica, la electroinformática y las ciencias cognitivas, podrían resultar, en el mediano-largo plazo, en la transformación de la «naturaleza» humana al alterar el cuerpo y la mente, supuestamente hacia algo «mejor», lo que sea que ello signifique.

Con el desarrollo de la nanotecnología se está gestando un proceso de integración entre ciencias tradicionales como la química, la física y la biología con las ingenierías e incluso con las ciencias sociales. En este sentido, ¿cómo deberían concebirse los estudios universitarios actuales sabiendo que históricamente se ha favorecido la especialización?

Como mencioné anteriormente, una de las características de la nanotecnología —que empieza a ser compartida por diversas tecnologías de frontera y que, por tanto, se comienza a denominarlas «convergentes»—² es que su propio desarrollo obliga al cruce de diversas disciplinas. Como es natural, desde una perspectiva tecnológica, en un primer orden será entre las ciencias básicas y las aplicadas, y desde luego, cuando esté más refinado el conocimiento y la innovación, con las ingenierías, propiamente enfocadas al escalamiento y optimización de procesos. Por supuesto, estas están siempre presentes desde el momento en que son también esenciales para el diseño y desarrollo de instrumental de investigación. Ahora bien, desde una perspectiva social-humanista, el avance nanotecnológico se vincula, de manera directa, con las ciencias sociales y las humanidades dado el gran potencial, pero también la incertidumbre que dicha tecnología acarrea, y en tanto la ciencia y la tecnología son actividades humanas. Por consiguiente, consideramos que dicha perspectiva, la social, tiene un peso principal en el desarrollo científico-tecnológico (desde luego, no se está obviando que el objeto tiene incidencia en el propio proceso investigativo, pero sí colocando esto en un segundo plano). La sinergia de la nanotecnología, con

tal campo de conocimiento, en principio debería ser tan importante como la que se establece con las ciencias naturales, exactas y las ingenierías. Sabemos que esto no sucede así, pero cada vez el cambio es mayor, en el sentido de hacer ciencia y tecnología verdaderamente interdisciplinarias; es decir, aquella que toma nota de las conexiones y aprovecha las sinergias entre las diversas disciplinas de las ciencias en general, de las ingenierías y de las humanidades. Se trata de maximizar el potencial y los beneficios que la tecnología de punta puede ofrecer, al tiempo que se disminuyen los eventuales riesgos (conocidos o previsibles), y se buscan y construyen esquemas que permitan socializar efectivamente los beneficios.

Por lo dicho hasta aquí, parece evidente que la formación de nuevas generaciones de nanotecnólogos deberá incluir conocimientos sólidos de principios básicos de la física, la química, la biología; de la ingeniería de materiales, y de diseño e industrial para el desarrollo de instrumental; de la economía/negocios; filosofía de la ciencia; ética, etcétera.³

La nanociencia y la nanotecnología, como prácticas científicas emergentes, exigen posturas éticas para los científicos, tecnólogos, instituciones y empresas que intervienen en las innovaciones que están ocurriendo en estas áreas del conocimiento. ¿Cuáles serían para con la sociedad en que se desarrollan?

Las posturas típicas son:

- La de la comunidad de científicos, tecnólogos e ingenieros, tendientes al optimismo tecnológico y usualmente escépticas a cualquier tipo de crítica social, inclusive a aquellas constructivas. Suelen comunicarse con un lenguaje especializado, que no permite el intercambio con otros actores.
- La de los intelectuales de las ciencias sociales y las humanidades; una postura crítica acerca del optimismo de quienes desarrollan tal frente tecnológico, con énfasis en cuestiones ético-morales, legales, económicas, sociales y ambientales. El sustento de las críticas suele ser sólido y aboga por una investigación responsable que tenga como plataforma un manejo social de esa misma índole. Su lenguaje tiende a ser cada vez más mixto, de manera que puedan comunicarse con diversos actores.
- La de algunas ONG, en las que predomina la crítica al avance científico-tecnológico que, en múltiples ocasiones, hace señalamientos, sin sustento sólido, que generan miedos parcial o totalmente incorrectos (lo que no quiere decir que todo sea desatinado). Suelen comunicarse con sus pares con un lenguaje coloquial que no siempre facilita el entendimiento con otros, sobre todo con la comunidad de científicos, tecnólogos e ingenieros.

- La de la sociedad en su conjunto, tanto en países metropolitanos como en los periféricos, que no tiene un conocimiento amplio sobre el tema de la ciencia y la tecnología, en general, ni de la nanotecnología en particular. La opinión de que existe un «miedo irracional» en el público o de que «el público es ignorante», y por ello acepta señalamientos incorrectos de parte de ciertos actores, es inexacta, pues, por un lado, en su mayoría, no sabe qué es la nanotecnología; por el otro, creer que es «ignorante» es bastante ingenuo, riesgoso, y puede conducir a escenarios de rechazo social generalizado, como ocurrió, en un principio, en el caso de los organismos genéticamente modificados (OGM). Desde esta óptica, se suele asumir al público como un actor pasivo ante el cual no es necesario ser transparentes ni comunicativos.

Ahora bien, vale señalar que estas categorizaciones son meras generalizaciones; no se pretende comunicar que se asumen actores «puros». Siempre hay excepciones: científicos o ingenieros con sentido ético-social; filósofos o economistas interesados en un genuino desarrollo tecnológico responsable y, por tanto, con interés en comunicarse constructivamente con dicha comunidad; activistas con formación académica y responsabilidad social en su vínculo con la sociedad; o medios de información que pretenden informar al público, y no solo dar cuenta de la nota atractiva o conveniente, etcétera.

En el mundo están teniendo lugar cambios climáticos a causa de la contaminación ambiental provocada por el avance tecnológico de la sociedad contemporánea. ¿Cómo puede contribuir la revolución nanotecnológica a combatir dicha contaminación? ¿Qué riesgos puede traer aparejados?

Los riesgos son los que ya he señalado, y tienen que ver con la complejidad y el alto grado de incertidumbre del propio avance de la nanotecnología puesto que se está trabajando en la frontera de lo desconocido. Por otro lado, el potencial es enorme; la nanotecnología promete habilitar una serie de soluciones a problemas ambientales diversos, desde la descontaminación atmosférica, del agua y los suelos, hasta la generación de energías limpias.

Si se desarrolla de modo responsable y cuidadoso, los impactos benéficos pudieran ser de gran peso. Por ejemplo, entre los beneficios estaría una reducción importante de los niveles de consumo de recursos necesarios en los procesos productivos, pues se mejoraría la eficiencia tanto en los insumos utilizados como en energía consumida —nanotecnologías de prevención de contaminantes—, y los sistemas fotovoltaicos y/o de producción de hidrógeno como combustible; se ampliarían los ciclos

de restitución de los medios de producción —gracias al uso de materiales más resistentes—, así como otras aplicaciones puntuales como el desarrollo de procesos de remediación ambiental, de nano/sensores de contaminantes químico-biológicos o inclusive en el desarrollo de materiales para la ecoconstrucción (por ejemplo, concentradores/aislantes de calor, asfalto filtrante del agua, etcétera).

Tal vez uno de los ejemplos más llamativos en términos del potencial beneficio medioambiental y como alternativa —entre otras— a la fuerte dependencia de la economía mundial a fuentes de combustibles fósiles, es el uso de la nanotecnología para «mejorar» las celdas fotovoltaicas. Además, mediante la optimización de electrodomésticos o de líneas de transmisión, posibilitaría un sustancial ahorro energético. Se conoce que entre las principales limitantes del uso extensivo de la energía solar están la baja eficiencia de la conversión energética y el costo de fabricación de las celdas. Estos factores se ven reflejados en precios de entre cuatro y cinco dólares por watt, frente a uno por watt en el caso de los combustibles fósiles (cuyo valor, claramente, no es representativo del costo ecoambiental de su producción).

La nanotecnología promete cambiar tal situación, al abrir las puertas al nanodiseño de novedosos materiales semiconductores *ad hoc*, con características diversas, como el plausible incremento de la eficiencia de las fotocélulas, la extensión de los niveles de conversión de energía por superficie cuadrada, y la maleabilidad de las fotoceldas.

A la par, otro de los potenciales importantes es el referente a la purificación de agua. Las aplicaciones en este rubro se clasifican en:

- Membranas para nanofiltración. Desarrollo de nanomateriales para construir estructuras con dimensiones, densidades y formas controladas, capaces de filtrar selectivamente virus, bacterias, etcétera.
- Filtros basados en nanopolímeros, arcillas de atapulgita y zeolitas con la novedad de nanodiseño de propiedades como el tamaño de poro o la inclusión de nanopartículas bactericidas.
- Mejora de técnicas de desalación (ósmosis inversa) mediante la combinación de nanomembranas y sistemas de nanofiltrado.
- Uso de nanopartículas (dióxido de titanio, de hierro, plata, zinc) como catalizadores más eficientes en la degradación de contaminantes orgánicos y para eliminar sales y metales pesados de los líquidos en los que están disueltos.
- Nanosensores para la detección de contaminantes.

Teniendo en cuenta que la vanguardia en esta área del saber científico-técnico está principalmente en manos de los países del

La nanotecnología también implica riesgos que amenazan con romper con los valores económicos, políticos, ambientales y éticos que imperan en nuestra sociedad. Por ello debemos centrar nuestra atención en minimizar estos impactos, de modo que se puedan evitar conflictos y se propicie una aplicación controlada y ordenada de los avances de esta novedosa rama de las ciencias naturales.

Primer mundo, ¿qué importancia tiene para Latinoamérica insertarse en los escenarios que la nanotecnología promete? ¿Cuáles son las implicaciones de ello?

Es evidente que el grueso de la nanotecnología es resultado del avance realizado en países como los Estados Unidos, Japón, China, Corea del Sur, Rusia y varias naciones de Europa. En el resto del planeta son pocos los aportes en términos de patentes; pero, sobre todo, de impactos socioeconómicos directamente asociados al limitado o nulo desarrollo científico-tecnológico propio de la periferia. En América Latina, en contraste con el escenario metropolitano, se identifica una fuerte desarticulación entre los actores típicamente involucrados en la Investigación-Desarrollo (I-D) de la ciencia y la tecnología «de punta»: el Estado, la empresa y los centros de producción de conocimiento. A diferencia de los casos indicados, e incluso de los de Argentina y Brasil, en México no existe aún un plan nacional en nanociencia y nanotecnología, y mucho menos iniciativas regionales de cooperación maduras. Aunque hay acuerdos puntuales entre individuos e instituciones internacionales, en ningún caso se trata de esquemas endógenos de tipo integrador a nivel nacional. Tampoco cuenta con regulaciones al respecto, ni en lo que se refiere a estímulos formalmente establecidos y reconocidos, ni en el establecimiento de procedimientos y normativas para la I-D, de lineamientos sobre propiedad intelectual, de cuidado de la seguridad de los trabajadores o de la calidad y la certidumbre de las importaciones que contienen nanoestructuras o que hacen uso de algún tipo de «nanosolución».

América Latina y el Caribe se encuentran en la retaguardia del avance de la ciencia y la tecnología en casi todos los índices. La región concentra solo 1,9% de la inversión mundial en I-D, sin cambio alguno desde 1997. De ese porcentaje, Brasil contribuyó con 59,7% en 2007, México con 20,9% según datos de 2006, y Argentina con 5,8% para el año 2008.

En cuanto al número de investigadores por cada mil habitantes económicamente activos, las cifras para 2003 eran entre diez y quince veces más altas en los países metropolitanos que en la región. En 2006, 50,4% de los

investigadores en activo laboraban en Brasil, 21% en México, 14,9% en Argentina y 6,8% en Chile.⁴

De modo similar sucede con los artículos publicados por cada cien mil habitantes, donde el promedio regional fue de 3,1 para 2003, al tiempo que en los Estados Unidos gira en torno a las seis decenas. En tal sentido, se calcula que América Latina contribuye solo con 3% de los artículos del *Science Citation Index*. En lo que respecta al número de doctorantes por cada cien mil habitantes, el promedio de la región es de 1,6 mientras que en los Estados Unidos es de 10, y en países europeos la cifra alcanza los 14. Más aún, la disparidad entre egresados y profesionales en activo sugiere una creciente tendencia a la pérdida de cerebros. En 2007, las cifras de la movilidad de estudiantes, por región de origen y destino, sugieren que América Latina «movilizó» 6% del total mundial de estudiantes, de los cuales 43,2% se va a territorio estadounidense, 30,9% lo hace a Europa, mientras que 22,9% se mueve dentro de la región de origen. Se estima que la fuga de cerebros latinoamericanos representa 80% de los graduados de nivel superior de Haití, Guyana y Jamaica, quienes viven en el exterior, sobre todo en los Estados Unidos. El monto para egresados de México, Argentina, Nicaragua y Honduras está entre 30 y 35%. En el caso de los mexicanos, se estima que unos 475 000 profesionales y graduados residen en los Estados Unidos, de esos, aquellos con doctorado representan, al menos, 30% del total de doctores que genera México.

No obstante, hay científicos y tecnólogos de primer nivel que permanecen trabajando en el endeble aparato científico-tecnológico nacional. En ocasiones, hacen aportaciones de frontera, aunque tienden a ser más en ciencia que en tecnología. La periferia debería comenzar a generar su propio desarrollo tecnológico vinculado, no a la mejor mercantilización posible de las innovaciones, sino a un proyecto de nación fundamentado, sobre todo, en las necesidades sociales de sus pueblos. El proceso es complejo y seguramente requerirá de alianzas estratégicas Sur-Sur, que permitan disminuir las asimetrías con las metrópolis, al tiempo que se disminuye el grado de subordinación y dependencia tecnológica. En este último punto, tal vez uno de los

aspectos más relevantes sea la cuestión legal, pues se trata de herramientas funcionales al sistema capitalista de producción que bloquean o limitan la innovación independiente de la periferia. Cuba tiene gran experiencia en ello pues ha estado sujeta a bloqueos y limitaciones en su quehacer científico-tecnológico que le han impedido valerse de la propiedad intelectual (léase patentes), instrumentos claves para la investigación y el avance de la biotecnología o la nanotecnología.

Actualmente en Latinoamérica existen factores que atentan contra el acceso a una información confiable sobre el uso de productos nanotecnológicos, ya sea por el alto nivel de analfabetismo o por la hegemonía que ejercen los medios masivos de comunicación. ¿Cómo se pudiera socializar los provechos y minimizar los riesgos del consumo de estas nuevas tecnologías?

En general, el acceso a información de buena calidad, sobre todo cuando se trata de tecnologías de frontera, es limitado y usualmente costoso. Esto hace que el análisis y la evaluación sobre el tema sea cuestión de especialistas, que luego comunican sus apreciaciones hacia un público más amplio. De cualquier modo, es evidente que en la arena de los expertos la información fluye. El problema es que el trabajo de periodismo científico es insuficiente en términos generales, pero mucho más en América Latina, al tiempo que los medios de comunicación tienden a limitar sus acciones por divulgar —a menudo mal o de modo muy superficial— los avances e implicaciones de las nuevas tecnologías.

Ahora bien, para socializar los beneficios y minimizar los costos, es necesario hacer dos cosas. Primero, una amplia y seria investigación —permanente— acerca de los potenciales riesgos de las nanotecnologías. El problema actual respecto a este punto es que la investigación científica sobre tales aspectos no es bien reconocida en términos de valor o puntaje en los sistemas de reconocimiento científico-tecnológico de evaluación de pares; y que los fondos para dicho rubro aún son mínimos —en términos reales, menores a 3% del total del gasto público mundial en I-D, en nanociencia y nanotecnologías.

Sin embargo, un avance que debe subrayarse es el que realiza el Comité Técnico 229 de la ISO por el desarrollo de los «Mejores estándares internacionales en prácticas sobre especificaciones de (nano)materiales», al reconocer la urgente necesidad de desarrollar protocolos internacionales para evaluar la toxicidad y los impactos ambientales de los nanomateriales, incluyendo su desecho y reciclamiento. Aun así, los esfuerzos, desde mi punto de vista, deberían ser mayores, pues el ritmo de avance y uso de la nanotecnología a escala comercial aumenta en una proporción que no se corresponde con el de los estudios sobre los posibles riesgos asociados ni con el de su regulación.

Ante ello, es cada vez más evidente que se debe estimular el manejo social de la nanotecnología; o sea, un contexto de diálogo y pacto social en el que se puedan efectivamente comunicar, decidir e implementar medidas correctivas o de estímulo de manera socialmente concensuada. Lo anterior obliga al diálogo constante, informado y constructivo entre los diversos actores sociales, para lo que será necesario no solo aprender a comunicarse con distintos lenguajes, sino que existan actores que se dediquen a estimular y gestionar el diálogo social, únicamente como facilitadores del proceso.

El proceso de manejo social de la nanotecnología no significa que se evitará todo riesgo, sino que se pacta el rumbo del avance científico-tecnológico y, en ese mismo sentido, de los riesgos que como humanidad estamos dispuestos a asumir en conjunto, pues los potenciales beneficios pesan más que los posibles riesgos. Es en este modo que se entiende la distribución social del riesgo. Esto es importante porque se trata, por un lado, de maximizar y socializar beneficios, y por el otro, de minimizar costos y socializar el riesgo.

El ejercicio debería incluir reflexiones en torno a si es necesario desarrollar las nanociencias y la nanotecnología en tal o cual país, a cambio de cuáles otras tecnologías u opciones de gasto social y, en ese caso, en qué medida y en qué áreas de conocimiento y aplicación, de modo que se aprovechen mejor los recursos en relación con las necesidades sociales más apremiantes. Piénsese esto para el caso de América Latina. En consecuencia, hay que definir responsables, tanto para estimular la innovación científico-tecnológica, la comercialización y uso de productos que emplean la nanotecnología, como para regular y proteger el medio ambiente y la salud de los consumidores y de la sociedad en general, frente a eventuales riesgos. También habría que tener en cuenta el modo de comunicar los alcances e implicaciones «reales» de la nanotecnología a los hacedores de política y de toma de decisiones, y al público en general; de enseñar a las generaciones de posibles profesionales cuál es el futuro de este frente tecnológico; de delimitar y coproducir —socialmente— el tipo de ética que requiere el avance responsable de tecnologías tan complejas como esta, entre otros elementos.

En algunos países de América Latina la falta de un sector empresarial nacional interesado en llevar las innovaciones derivadas del desarrollo nanotecnológico a la vida cotidiana atenta contra la posibilidad de un desarrollo sostenible. ¿Qué actores sociales deberán movilizarse para lograr este desarrollo?

Primero hay que aclarar que crecimiento económico no es necesariamente desarrollo. De hecho, podemos tener un aumento en el Producto Interno Bruto (PIB) y una disminución de la calidad de vida del grueso

de la población, usualmente debido a una creciente polarización de la riqueza y al aumento de actividades extractivas, cada vez más agresivas del medio ambiente, y con retornos económicos en el largo plazo que tienden a ser decrecientes.

En lo que refiere al desarrollo sostenible, este es en sí mismo un oxímoron, pues para sobrevivir es necesario transformar la naturaleza y, por tanto, contaminar. El punto es cómo lograrlo bajo esquemas que eviten al máximo todo tipo de despilfarro de recursos (materiales y energía). En tal sentido, es más correcto hablar de desarrollo menos devastador o, para alejarnos del tan manoseado concepto de desarrollo sustentable, podría hablarse de un ecodesarrollo que tienda a un decrecimiento de los flujos de materiales y de energía.

Con esto en mente, se puede decir que la nanotecnología no garantiza necesariamente un ecodesarrollo. Puede contribuir con innovaciones en procesos productivos, en el mejoramiento de los bienes finales o en la innovación de nuevas tecnologías para la generación de energía o de biorremediación. No obstante, para ser justos en la apreciación, si no se maneja responsablemente, también puede contribuir a empeorar el estado actual del planeta con la emisión de nuevos tóxicos, cuyo impacto, por el momento, no se puede predecir del todo.

Así, el ecodesarrollo que tienda a un decrecimiento en el consumo de energía y materiales requiere, en general, esquemas más equitativos de distribución de la riqueza, de la disminución de todo consumo irracional desde el punto de vista de la lógica de la vida; esto es, que el desarrollo se entienda desde una perspectiva de largo plazo como aquel que, lejos de buscar la acumulación de capital, por el contrario, busque el «buen vivir» de los pueblos. En el esquema, la ciencia y la tecnología pueden contribuir, si tienen en cuenta esta lógica. En un sector empresarial que atiende los «impulsos del mercado», el buen vivir es un subproducto de la acumulación de capital; pero no necesariamente sucede así (aunque a veces también puede serlo) si se trata de uno gubernamental. En cualquier caso, lo importante es cómo disminuir la carga ambiental, al tiempo que se mejora el nivel de vida del grueso de la población, y no solo de un pequeño sector privilegiado. Tómese nota de que, en el planeta, entre 50 y 60% de la población aún está fuera, casi por completo, de los beneficios de las tecnologías convencionales.

Sabemos que la asimilación de una nueva revolución tecnocientífica por las sociedades constituye un proceso paulatino, en el que bienes derivados de las nuevas tecnologías coexisten con los de las precedentes. Esto tiene una particularidad en los países del Tercer mundo, donde por lo general estos productos se importan, y con ellos los valores culturales del Primer mundo. ¿Cómo asumir esta situación desde Latinoamérica?

Considero que si América Latina va a subirse al tren de la innovación, deberá hacerlo en la frontera del conocimiento y en las áreas y aplicaciones concretas que realmente les sirvan a los pueblos; fundamentalmente energía y salud. La lógica no será la competitividad, sino la satisfacción de necesidades. Y si se puede ser competitivo, mejor aún.

Ahora, si pensamos que el «buen vivir» también es un proceso paulatino que además debe considerar la riqueza cultural de los pueblos, entonces podemos acoplar el desarrollo tecnológico a un replanteamiento de lo que se entiende por desarrollo.

Considerando que los Estados Unidos son el país con mayor desarrollo nanotecnológico, ¿cómo influye la aparición de los nanomateriales en su industria armamentista? ¿Qué amenazas pudieran ceñirse sobre el Tercer mundo, particularmente sobre Latinoamérica, teniendo en cuenta las condiciones geopolíticas actuales?

Se estima que en el mediano y largo plazo la naturaleza de la guerra sea completamente transformada, si las promesas tecnológicas se hacen realidad. Se habla, por ejemplo, de que la determinación del grado de confianza para ejecutar o resistir una agresión militar se volvería ineficaz, dadas las características y rapidez que alcanzaría la fabricación del armamento; que el tiempo para la toma de decisiones de emergencia y de inteligencia se reduciría; que el instrumental para la infiltración encubierta de inteligencia y de sabotaje haría más difusa la distinción entre confrontación y guerra; que, en el espacio, los satélites civiles y militares (propriadamente de espionaje), podrían ser atacados fácilmente por otros mini(nano)-satélites que tuvieran como misión dejar «ciego» al enemigo; o que el armamento nuclear podría volverse, por un lado, más eficaz, pero también altamente vulnerable a novedosas técnicas de ataque o neutralización.

El asunto no es menor, al punto de que la OTAN ya le otorgó especial atención cuando su Subcomité en Proliferación de Tecnología Militar debatió, en septiembre de 2005, las «implicaciones de la nanotecnología a la seguridad».

Se trata efectivamente de una situación difícil que sugiere tornarse aún más compleja en el caso de la regulación de las aplicaciones militares de las «tecnologías convergentes» (dado el amplio espectro que abarcan). Esta regulación, como en el caso de lo nuclear, no solo dependerá de la «voluntad política» de las partes o de las implicaciones diplo-militares que acarrea ese tipo de tecnologías de guerra, sino que queda, en buena medida, bajo función de vastos intereses económico-empresariales: los relacionados con el negocio de la guerra.

Ahora bien, las innovaciones militares, en su gran mayoría, están en manos de los Estados Unidos. Muchas

son de carácter confidencial; pero se sabe que entre las prioridades militares de la Iniciativa Nacional en Nanotecnología, de los Estados Unidos, destaca la búsqueda de soluciones para la detección y protección contra armas biológicas, químicas, radiológicas y explosivas, así como para el monitoreo del estado de salud de cada soldado, con el objetivo de aumentar su sobrevivencia mediante nanobiosistemas. También se indica el desarrollo de sensores inteligentes, nanofilamentos o nanopolvos para la confección de ropa, máscaras y equipo militar personalizado, con funciones camaleónicas en relación activa con el medio ambiente; para proteger de la insolación a través de materiales de alta nanoporosidad, indetectables a los sistemas de visión nocturna; neutralizantes de agentes químico-biológicos, o que «administren» antídotos.

Desde la perspectiva de la capacidad ofensiva, otros rumbos de investigación militar anuncian que el Departamento de Defensa de los Estados Unidos busca alentar el ensamblaje tridimensional de nanoestructuras para desarrollar mejores versiones de la mayoría de las armas tanto nucleares como convencionales —armamentos más ligeros y con mayor capacidad de municiones, miras multiespectro, balas guiadas, o armas que se auto-disparan cuando se detecta el enemigo—, así como nuevos materiales para armas no convencionales (inclúyanse las químico-biológicas). Asimismo, se precisan investigaciones para el perfeccionamiento de los sistemas de almacenamiento de energía.

En este marco de actividades, la Oficina de Ciencias para la Defensa (DSO) de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA), de los Estados Unidos, reporta las siguientes áreas de interés: materiales y estructuras, protección de soldados y vehículos, materiales funcionales y cuánticos, dispositivos de defensa para la guerra biológica —que incluye, por principio, el desarrollo de capacidades ofensivas, entrenamiento y simulación, y matemáticas fundamentales aplicadas a las necesidades

del funcionamiento de las redes operativas del Pentágono y al diseño de sus juegos y planes de guerra. Se trata de áreas desde las que la DARPA ha impulsado múltiples programas específicos para el desarrollo de armaduras y fibras avanzadas, electrónicos moleculares, robótica dinámica multifuncional de bioinspiración, motores biomoleculares, sistemas sintéticos bio-ópticos; técnicas de detección de agentes a larga distancia, sistemas y dispositivos nano-biomoleculares, materiales de alto rendimiento y resistencia, metamateriales, ciencia y tecnología de la información cuántica, superficies autodescontaminantes, sensores *stealth*, materiales multifuncionales sintéticos, etcétera.

Notas

1. El debate se puede resumir brevemente como la confrontación de interpretaciones sobre las razones por las cuales se da el Principio de Incertidumbre de Heisenberg (1927) según el cual el producto de las incertidumbres en dos entidades (no conmutadas) debe necesariamente exceder la constante dada. Ello implicó lo que ahora se conoce como las leyes de la Física cuántica y en las que se establece que, en principio, es imposible determinar una descripción exacta del comportamiento de los sistemas físicos como unidad.
2. Me refiero fundamentalmente a la nanotecnología; biotecnología/ingeniería genética (biología sintética); la electroinformática (*software*, *hardware*); y la socio-cibernética/ciencias cognitivas.
3. Para una propuesta preliminar de este tipo de ejercicio, véase *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, v. 2, n. 2, publicación que editan los doctores Gian Carlo Delgado y Noboru Takeuchi, disponible en www.mundonano.unam.mx.
4. Banco Interamericano de Desarrollo, «Educación, ciencia y tecnología en América Latina y el Caribe: un compendio estadístico de indicadores», BID, Washington, DC, 2006.