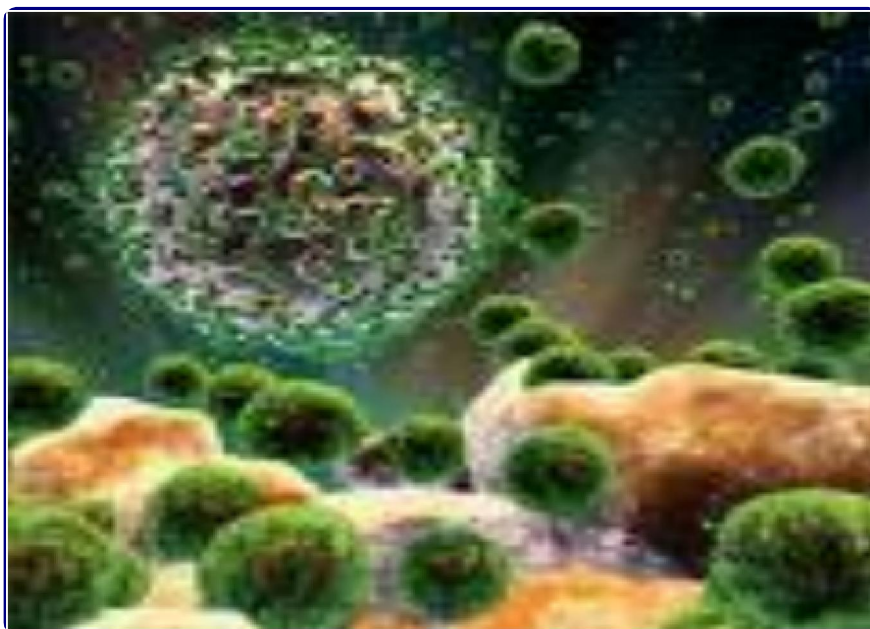


INCERTIDUMBRES DE LA NANOTECNOLOGÍA: RIESGOS AMBIENTALES Y SALUD



RESUMEN

Gian Carlo Delgado Ramos, Ph.D.

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias
y Humanidades.

Universidad Nacional Autónoma UNAM; México,
giandelgado@gmail.com;

La nanotecnología, al igual que toda tecnología de vanguardia, se desarrolla en la frontera de lo desconocido y, como tal, acarrea consigo un umbral de incertidumbre. Al manipular la materia a escala nanométrica (mil millonésima de metro), los potenciales riesgos sugieren ser no sólo relativamente impredecibles, sino también imperceptibles a nuestros sentidos. En tal tenor, la apreciación de las eventuales implicaciones del avance nanotecnológico es altamente compleja; más aun si se toma nota de cuestiones éticas, legales, socioeconómicas, ambientales y de la salud.

El artículo evalúa los estudios y discursos existentes en torno a las promesas del uso de nanoestructuras y sus impactos en el medio ambiente. Asimismo lo hace para el caso de la salud al indagar el caso de las aplicaciones de la nanomedicina, los (nano) cosméticos y los novedosos tratamientos de cáncer.

* Recibido : Agosto 3 2007 * Aceptado : Octubre 15 2007

PALABRAS CLAVES

Nanotecnología, incertidumbre, riesgos, medioambiente, salud, cosméticos, cáncer.

ABSTRACT

The nanotechnology, as any leading edge technology, develops in the border of the unknown thing and, as such, it provokes a degree of uncertainty. On having manipulated the matter to a nanometric scale (thousand millionth of a meter), the potential risks suggest to be not only relatively unpredictable, but also imperceptible to our senses. In such a tenor, evaluating the eventual implications of the nanotechnological progress is a very complex task. And even more if we take into consideration all ethic, legal, socioeconomic, environmental and health issues.

The present article evaluates studies and discourses related to promises about the use of nanostructures and their environmental impact. It also treats health impact by evaluating nanotechnology to medicine application, nano make-up and new cancer treatment.

KEYWORDS

Nanotechnology, uncertainty, risk, environment, health, make-up, cancer.

1. INTRODUCCIÓN

Las promesas que genera la nanotecnología son de tal magnitud que varios países y sus multinacionales, y el grueso de estados capitalistas centrales, están incrementando exponencialmente sus gastos en investigación al respecto. Se dice que entre los campos de operación de mayor potencial en el corto/mediano plazo figuran los que permiten: (1) la construcción de estructuras materiales novedosas, (2) aplicaciones en el procesamiento, almacenamiento y transmisión de información, (3) desarrollo de sistemas sensoriales y (4) usos químicos y nanobiotecnológicos. En el largo plazo destaca, entre otras áreas, el potencial del autoensamblaje

de la materia (fabricación de autoensambladores o nanofábricas y nanorrobots -si es que eso es técnica y físicamente posible).

La descripción más adecuada de nanotecnología tal vez sea la contenida en las definiciones oficiales y que, en general, coinciden en que se trata de una tecnología que opera a la nano escala, es decir que trabaja en dimensiones de entre 10^{-6} a 10^{-9} de metro o, siendo más precisos, la que, como indica la Royal Society, opera manipulando estructuras y sus interacciones de entre los 100 nanómetros (nm) hasta el tamaño de los átomos (aproximadamente 0,2 nm). Ello responde a que a esa (nano) escala las propiedades de los materiales pueden ser muy diferentes que a la macro escala (Royal Society, 2004). No obstante, algunas disciplinas, como la denominada nanofotónica, siguen esencialmente haciendo el mismo tipo de investigaciones que cuando se denominaba fotónica. El caso es compartido por otras áreas de conocimiento científico-tecnológico, lo que sugiere que dicha tendencia de disciplinas madres e hijas (nano) es reflejo de una debilidad de las fronteras entre las disciplinas que operan a una misma escala, pero no como producto de una convergencia espontánea, sino como consecuencia del avance del conjunto de fuerzas productivas capitalistas de fines del siglo XX y de lo que va del XXI.

Por el momento, casi todas las aplicaciones vienen girando en torno al perfeccionamiento de materiales existentes y a la innovación de nuevos materiales. Ésos están siendo utilizados en productos de lujo como bolas de tenis, golf o boliche (a fin de reducir el número de giros que dan las mismas); nanopartículas de zinc para la fabricación de neumáticos de alto rendimiento; fibras para la fabricación de telas con propiedades antimanchas o antiarrugas; nanopartículas para cosméticos, fármacos y nuevos tratamientos terapéuticos; filtros-membranas de agua nanoestructuradas y "remedios" ambientales; mejora de procesos productivos mediante la introducción de materiales más resistentes o eficientes; diseño de nuevos materiales para usos que van desde la electrónica, la aeronáutica y toda la industria del transporte, hasta su aplicación en armas más sofisticadas y novedosas (explosivos, balística, materiales antibala y stealth, etc.).

Las propiedades de tales materiales nanoestructurados, sustento de éstas y otras aplicaciones, ya han generado un doble llamado de atención. Por un lado, se observan los amplios beneficios que posibilitaría la reestructuración de prácticamente todo el entorno material que nos rodea, pero, por otro lado, se identifican las posibles implicaciones que esa transformación generaría en el

ambiente y, de ahí, en la salud, puesto que estarían presentes novedosas nanopartículas y nanoestructuras diseñadas por el ser humano (en adelante simplemente denominadas nanopartículas o nanoestructuras) cuyas características, en su gran mayoría, son todavía desconocidas.

2. PRINCIPALES TIPOS DE NANOPARTÍCULAS Y POTENCIALES RIESGOS AMBIENTALES

Cuatro son las principales clases en las que, en general, son clasificadas las nanoestructuras:

a) Los materiales de base de carbón: con formas esféricas, elipsoidales o tubulares. Los fullerenos¹ esféricos son a veces denominados como *buckyballs*, mientras que los cilíndrico-tubulares como nanotubos (mono o multicapa). Sus propiedades fundamentales son su reducido peso y su mayor dureza, elasticidad y conductividad eléctrica, entre otras.

b) Los materiales de base metálica: pueden ser *quantum dots* (puntos cuánticos o transistores de un solo electrón)² o nanopartículas de oro, plata o de metales reactivos, como el dióxido de titanio, entre otras.

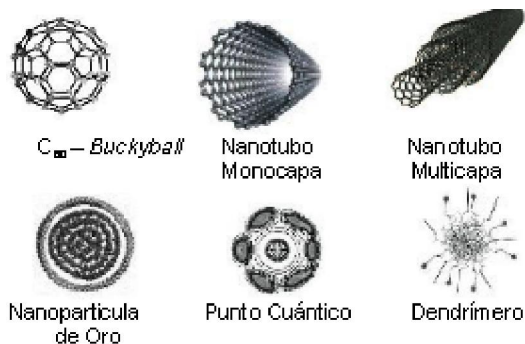


Figura 2. Tipos de nanoestructuras.

¹ Un fullereno es la tercera forma alotrópica de carbono (diamante, grafito y fullereno). Fue descubierta en 1985 como una sustancia donde cada molécula poseía sesenta átomos de carbono engarzados a modo esférico o elipsoidal. Si bien el C₆₀ es el más común, también hay fullerenos de carbono de más átomos como el C₇₀, C₈₄, C₂₄₀, C₅₄₀. En 1991 se detectó una forma más de carbono, el «nanotubo». Un nanotubo es un fullereno muy grande pero en forma lineal.

c) Los dendrímeros: son polímeros nanométricos contruidos a modo de árbol en el que las ramas crecen a partir de otras y así sucesivamente. Las terminaciones de cada cadena de ramas pueden diseñarse para ejecutar funciones químicas específicas—una propiedad útil para los procesos catalíticos. Además, dado que tienen cavidades internas, su uso médico para la ‘ entrega de suministro de medicamentos ’ es factible. Lo mismo sucede con el caso de algunas estructuras de carbón y metálicas.

d) Los composites: combinan ciertas nanopartículas con otras o con materiales de mayor dimensión (el caso de arcillas nanoestructuradas es un ejemplo de uso extendido para la fabricación de diversos productos -e.g. autopartes).

Se ha señalado que las propias propiedades que se están aprovechando de las arriba delineadas nanoestructuras y nanomateriales (por ejemplo, su superficie altamente reactiva y su habilidad de atravesar membranas) podrían resultar en peligros importantes, sobre todo en tanto a su potencial grado de elevada toxicidad (Royal Society, 2004).

Las implicaciones al medio ambiente en relación a tal toxicidad y a la biodegradabilidad de las nanoestructuras y los efectos de éstas a la salud de la diversidad de especies (incluyendo la humana), tanto en el corto como en el mediano-largo plazo, son de consideración, puesto que se estima que podrían interferir en las funciones vitales (Ibid: 45). La bioacumulación y persistencia de las nanopartículas a lo largo de la cadena alimenticia es también un factor a observar detenidamente (Ibidem).³ El asunto es complejo dados los vacíos en el conocimiento de la nanociencia y la nanotecnología. Entre éstos se identifican como de los más importantes: a) la insuficiente definición “del punto” en el que de hecho las propiedades cambian en relación con el tamaño (macro/micro/nano escala), b) la limitada claridad acerca de esas propiedades de la nanoescala c) el casi nulo

² Un punto cuántico es una estructura cristalina a nanoescala que puede transformar la luz. Se puede definir como una partícula de materia tan pequeña [el 70% de sus átomos son de superficie] que la adición de un único electrón produce cambios en sus propiedades. El punto cuántico se considera que tiene una mayor flexibilidad que otros materiales fluorescentes, lo que lo hace apropiado para utilizarlo en construcciones a nanoescala de aplicaciones computacionales donde la luz es utilizada para procesar la información. Los puntos cuánticos están hechos de una variedad de diferentes componentes, tales como cadmio o selenio.

conocimiento sobre las implicaciones de la interacción de tales o cuales nanoestructuras con el medio natural. La ingeniera ambiental Nora Savage de la Environmental Protection Agency (EUA) indica al respecto:

...los compuestos sobre los que tenemos datos toxicológicos, de destino/transporte o de bioacumulación/biodisponibilidad, tal vez necesiten ser re-analizados, debido al hecho de que en la nanoescala, las propiedades químicas y físicas usualmente se alteran [...] estamos aprendiendo que: 1) estos materiales necesitan ser [física y químicamente] bien caracterizados, de modo que los resultados de las investigaciones puedan ser comparables; 2) puede no ser tan apropiado examinar el uso de nanomateriales diseñados que si se hace desde los productos consumibles en los que éstos son incorporados; y, 3) no es suficiente afirmar que los nanomateriales fijados o incrustados en matrices no implican peligro ambiental o humano alguno – el destino final del producto debe ser considerado; si el producto es quemado, puesto en la tierra con líquidos y gases reactivos, reciclado, etc. (en Delgado, 2006).⁴

Según notifica Roco (del NSTC, EUA), en la coyuntura actual las preocupaciones inmediatas cubren, entonces, aspectos que van desde un mayor conocimiento acerca de la toxicidad de los nano-productos y los mecanismos y rutas de exposición a nanoproductos en el aire, agua y suelo, hasta la efectividad del equipo protector para los que manejan tales productos (como ropa y respiradores), las reacciones celulares ante nanopartículas o nanoestructuras y los mecanismos de prevención de escape de nanopartículas sintéticas en el

medio ambiente (Roco, 2005).

Para ello, es básico determinar, de modo general y particular, las características de los nanomateriales en interacción con el medio natural (y consecuentemente de sus posibles transformaciones). Esto es, por tanto, aspectos como:

- cuáles son sus mecanismos de transporte o movimiento en aire, tierra y agua y cuál es el grado de su capacidad de difusión (e.g. aerodinámica; de filtración en medios porosos como la tierra; o de disolución/dispersión en medios acuosos), de aglomeración, de deposición húmeda y seca;
- de sus propiedades gravitacionales; de su reactividad con moléculas o nanopartículas naturales (no diseñadas o nanoestructuradas) y cómo ello afecta sus características generales, incluyendo su toxicidad; o
- de cambios inducidos por reacciones fotocatalizadoras o inducidas por condiciones anaeróbicas (EPA, 2005).

De ahí que se indique la necesidad de estandarizar las nanopartículas y los nanoprocesos como fundamento para posibilitar la comparación de investigaciones (aunque es claro que también se trata de un mecanismo necesario para el avance de las nanotecnologías y la protección y garantía de la propiedad intelectual sobre los nano-descubrimientos). El Comité Técnico 229 de la Internacional Organization for Standardization (ISO) actualmente coordina dicha tarea al mando de delegaciones de EUA, Japón y Canadá (American National Standards Institute, 2005).

Ahora bien, lo interesante es que en pleno ascenso del estímulo a la nanotecnología y de los numerosos reconocimientos acerca de los potenciales peligros de las nanopartículas/nanoestructuras por parte de actores gubernamentales⁵, empresariales (Hett, 2004) o de ONG's (ETC Group, 2003; Arnall, 2003), el financiamiento y, por tanto, el número de estudios sobre los efectos toxicológicos y medioambientales sean comparativamente aún limitados, aunque al parecer se trata de una situación que está cambiando.

De cualquier manera, de las indagaciones al respecto, ya se visualizan ciertas características de los nanomateriales que podrían tener implicaciones medioambientales y a la salud. La Royal Society

³ La bioacumulación de nanopartículas es en buena medida determinada por las propiedades de sus superficies, lo que a su vez define si son retenidas por tejidos grasos, hueso o proteínas del cuerpo. La persistencia dependerá en cambio de su descomposición o modificación por el medio ambiente (Ibidem).

⁴ Vicki Colvin, directora ejecutiva del Centre for Biological and Environmental Nanotechnology de la Rice University, asegura que, "...ya sea un catalizador de zinc incrustado en el caucho de un neumático o plomo en pintura para casas, la concentración de sustancias no-naturales en el medioambiente se incrementará en proporción directa con su uso en la sociedad. Si las aplicaciones de nanomateriales de ingeniería se desarrollan como se tiene proyectado, el incremento de concentraciones de nanomateriales en el aguas subterráneas y la tierra pueden representar los canales de exposición más significativos para evaluar los riesgos medioambientales" (Colvin, 2003: 1166-70).

⁵ Por ejemplo: Roco y Bainbridge, 2001; Tomellini y Roco, 2002; EPA, 2002; Roco y Bainbridge, 2003; Royal Society, 2004; Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2005; EPA, 2005.

suscribía en el año 2004 que,

...la evidencia sugiere que por lo menos algunas nanopartículas manufacturadas serán más tóxicas por unidad de masa que aquellas del mismo químico pero de mayor dimensión. Esa toxicidad está relacionada al área de superficie de las nanopartículas (que es mayor respecto a su masa que en el caso de partículas más grandes) y a la reactividad química de la superficie (que puede incrementarse o reducirse mediante el uso de una película envolvente dada – surface coatings). (Royal Society, 2004: ix)

Tal reactividad química de la superficie de las nanopartículas es de mayor consideración ambiental pues se considera que las enzimas naturales presentes en el medio ambiente pueden cambiar las propiedades de la superficie de las nanopartículas nanoestructuradas y convertirlas en coloides (partículas que no se conglomeran y que no se depositan, por lo que mantienen un alto grado de movilidad en líquidos).⁶ Estas nanopartículas con características coloidales, según Colvin, podrían ser ideales para la transportación a larga distancia (dígase acuíferos) de material tóxico, como contaminantes hidrofóbicos y metales pesados, por ejemplo, al reaccionar con moléculas mayores pero de menor movilidad, como las ya contenidas en fertilizantes y pesticidas (Colvin, 2002; Hett, 2004).

Igualmente se advierte que, considerando la reactividad propia de los fullerenos, éstos se tornan potencialmente tóxicos, sobre todo si se toma en cuenta que son materiales lipofílicos que tienden a ser almacenados por los organismos en zonas de tejidos grasos. De ahí que Eva Oberdorster haya corroborado que los fullerenos, como el C_{60} pueden inducir un estrés oxidante en los cerebros de los peces róbalo (Oberdorster, 2004: 1058-62). Y puntualiza: "...no sabemos si los fullerenos son tóxicos porque son metabolizados o si son menos tóxicos debido al metabolismo" (en Helland, 2004: 23). Más aun, Lovern y Klaper sugieren un considerable grado de mortalidad del *Daphnia Magna* (un diminuto crustáceo, popular alimento para peces de acuario, y usualmente utilizado por su sensibilidad en estudios de ecotoxicológicos) cuando es expuesto a nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y al fullereno C_{60} (Lovern y

Klaper, 2006).

Investigaciones de Günter Oberdorster et al., (2002 y 2004) sostienen también que, con base en estudios con ratas, las nanopartículas de carbón pueden entrar directamente desde la nariz hacia los lóbulos olfativos y hasta el cerebro a través de los nervios olfativos. Otras publicaciones han señalado que, además de que ciertos nanomateriales podrían ser efectivos como agentes bactericidas tanto para bacterias positivas como negativas en un cultivo dado, en particular los fullerenos del tipo C_{60} podrían potencialmente inhibir de modo importante el crecimiento y la respiración de los microbios (EPA, 2005).

Asimismo, Yang y Watts, (2005), reportan que las nanopartículas de aluminio (de 13 nanómetros) pueden estar involucradas en el enlentecimiento del crecimiento de las raíces de plantas como el maíz, el calabacín, la soya, la col y la zanahoria. Aunque, si las nanopartículas son cubiertas de fenantrene (un hidrocarburo aromático), dichos efectos se "aminoran". El caso de nanopartículas de aluminio de mayor dimensión no registró tal impacto en las plantas. Y si bien tales resultados se limitan a ensayos de laboratorio, la incertidumbre sobre sus posibles impactos ya está presente.

De cara a tales y otras indagaciones científicas, que de entrada muestran lo limitado que aún es el conocimiento sobre el comportamiento y las características de las nanoestructuras, la respuesta general de esa comunidad ha sido que los resultados son provisionales y que traen más preguntas que respuestas, razón por la cual, a decir de Eva Oberdorster, se trata, en el peor de los casos, más bien de "luces amarillas" y de ninguna manera de "luces rojas" (en Feder, 2005). De cualquier modo, como acertadamente advierte Altmann:

...llama la atención el hecho que las nanopartículas estén siendo usadas en productos haciendo sólo uso de la licencia sobre el material en bruto a pesar de que cada publicación sobre la temática sostiene que a la nanoescala la materia muestra diferentes propiedades, y las nanopartículas pueden entrar a través de los poros donde otras más grandes no pueden (Delgado, 2006).⁷

Efectivamente, todo indica que los cuidados, las regulaciones y las responsabilidades de quienes están desarrollando y/o estimulando tales o cuales aplicaciones, no están correspondiendo a la complejidad de este frente tecnológico. Como advierte ETC Group desde 2004,

⁶ Por ejemplo, Colvin sostiene que ciertos nanomateriales podrían absorber pequeños contaminantes como el cadmio y otros compuestos orgánicos. Y, consecuentemente como los coloides, podrían ser una vía de transporte rápido y a larga distancia de contaminantes en las aguas subterráneas (Colvin, 2002).

⁷ Dr. Jürgen Altmann trabaja en el Experimentelle Physik III de la Universidad de Dortmund (Alemania).

“...la nanociencia y la nanotecnología se están desarrollando en un vacío de regulación” (en Delgado, 2006; ETC Group, 2004-A). El señalamiento aún es válido dos años después y a seis años de que se comenzaran a visualizar científicamente los primeros peligros potenciales, aunque hay que reconocer que a partir de 2005 sí se admite formal y extendidamente la necesidad de más investigaciones desde las cuales eventualmente se desprenderían las regulaciones “necesarias”.

No sorprende, entonces, que en este panorama todavía de ausencia de regulación, ya existan cientos de “nanoproductos” en el mercado mundial sin mayor regulación específica. Tampoco que se sucediera, tal vez, uno de los primeros incidentes con un producto comercial, que según se especuló en un principio, al parecer contenía nanopartículas. Me refiero al sonado caso del spray de limpieza ‘Nano Magic’ de Easyglas GmbH (que fabricó el líquido), Chemotechnik GmbH (que añadió un químico anticorrosivo y el propelente) y Kleinmann (que lo distribuyó) y que ocasionó en abril de 2006 efectos de intoxicación a decenas de personas y que resultara en el retiro del mercado de ese producto.⁸

La negación de que se trataba de un producto que contenía nanopartículas fue rápida. A fines de mayo, Rene Zimmer del Instituto Federal para Evaluaciones de Riesgos (BfR, Alemania), lo señalaba aunque entonces aún no se aclarasen las causas de los problemas de respiración y los estudios fuesen parciales (Von Bubnoff, sin fecha).⁹ Todo, en momentos en que Kleinmann declaraba abiertamente poca preocupación pues, “...los consumidores alemanes tienen una memoria de corto plazo...muchos ni siquiera han oído acerca de esto” (Ibid).

Realidad o cubierta, tal vez lo más coherente, en términos de responsabilidad social, es la aplicación del

principio de precaución como un instrumento central, entre otros, de cara a la supuesta ausencia de resultados contundentes sobre los potenciales riesgos ambientales y a la salud.

3. LAS NANOPARTÍCULAS Y LA SALUD

El uso de nanoestructuras y nanodispositivos para nuevos sistemas de prevención, diagnóstico, tratamiento y regeneración, conforma el corazón de la denominada NanoMedicina –al menos por el momento-. Su utilidad, se indica, se debe a que éstos pueden interactuar de modo directo con las biomoléculas, tanto de la superficie de la célula como dentro de ésta.

El espectro de aplicaciones incluye: la mejora del instrumental de última generación para una ultra-avanzada resolución espacial, molecular y de sensibilidad (nanoimagen)¹⁰; perfeccionamiento y desarrollo de los procesos de diagnóstico in-vivo e in-vitro (e.g. mediante el desarrollo de sofisticados sistemas integrados de nano y micro biosensores¹¹ -externos e internos- para el monitoreo, en etapas de diagnosis, tratamiento y postterapia mejoras en los dispositivos de laboratorio-en-un-chip¹²; desarrollo de nanopartículas útiles para su monitoreo dentro del cuerpo o como agentes contrastantes para la obtención de imágenes de mayor resolución); aplicaciones para novedosas formas de ‘entrega de fármacos’ (más efectivas, focalizadas, de bajo coste y/o diseñadas específicamente para nuevos fármacos)¹³; tratamientos innovadores terapéuticos y de regeneración de tejidos o hueso (nanobiomimetics); e incluso, implantes de materiales biológico-inertes “mínimamente invasivos” (European Commission, 2005: 7-9; European Commission, 2006).

De modo similar a las promesas de la biotecnología (Delgado, 2002), enfermedades como el sida, el cáncer, la diabetes, la osteoartritis o trastornos neurológicos degenerativos (e.g. Alzheimer, Parkinson, multiesclerosis), cardiovasculares y del sistema nervio-

⁸ El caso ha sido resultado de un alto grado de irresponsabilidad sea el punto desde el que se vea. La versión de la empresa es que el producto es el único que es producido por una filial, razón por la cual no se tuvieron los mismos niveles de control que con el resto de productos de la compañía (incluyendo otros que también usan nanopartículas). La comunidad de “expertos” sostiene que aún no se sabe si en esos spray había realmente nanopartículas o no, y en su caso que, de lo que se trata es de un caso de impertinencia y no de incertidumbre de la nanotecnología per se pues Kleinmann probablemente desconocía los estudios de seguridad ambiental y a la salud sobre los compuestos que estaba utilizando. No obstante, el producto estaba etiquetado como seguro. Véase: Weiss, 2006. Para la versión de Leinmann, consúltese: www.kleinmann.net/html/index.php?name=News&file=article&sid=117

⁹ Contradictoriamente se sugiere que las causas de los problemas de respiración tal vez se deban a pequeñas gotas de solvente que penetraron muy profundo en los pulmones (como lo hacen las nanoestructuras). Según se indica, la declaración sobre la inexistencia de nanopartículas se sostiene en información otorgada por la empresa que manufactura el producto y estudios químicos comisionados o bien por el BfR o por la Verband der Chemischen Industrie (Asociación de la Industria Química Alemana) –la información al respecto es contradictoria y altamente controversial, informa Von Bubnoff. Véase: Von Bubnoff, sin fecha.

so, destacan en las primeras posiciones de la lista de eventuales beneficios de la NanoMedicina (European Commission, 2005). Siguen cuestiones como incapacidades fisiológicas que se intentan resolver en el largo plazo a través de sofisticados implantes que inclusive llegarían a “conectar” biochips al organismo (e.g. implantes de biochips directos al nervio ocular para la generación de imágenes, restitución de células neuronales con biochips, prótesis robotizadas, etc.).

Los potenciales riesgos a la salud humana son, sin embargo, considerables. No sólo como producto de la antes descrita exposición a nanoestructuras vertidas en el medio ambiente y moviéndose a lo largo de la cadena alimenticia, sino también debido a su uso en la NanoMedicina. Así es plenamente reconocido por la Plataforma Europea de Tecnología en NanoMedicina elaborada por representantes del sector industrial (e.g. Bayer, Novartis, Schering, GlaxoSmithKline¹⁴) cuando notaban que:

...los riesgos y los retos de la NanoMedicina comprenden asuntos como la toxicidad y la cancerogenicidad, así como la estabilidad a largo plazo y las rutas de excreción de las nanoestructuras artificiales y los retos en la manufactura molecular, la garantía de la calidad y, eventualmente, de la programabilidad de los nanodispositivos (Ibid: 12).

Por el momento las implicaciones inmediatas giran entorno a los riesgos de las nanopartículas a la salud

humana; de ahí que el grueso de los estudios de riesgo –la mayoría derivados de las propias investigaciones sobre las aplicaciones nanotecnológicas– se abogue a cuestiones de toxicología de las nanopartículas, ya sea por sea por exposición respiratoria, cutánea o por ingestión.

3.1. LA TOXICIDAD DE LAS NANOPARTÍCULAS INHALADAS

Los especialistas coinciden en que la vía más fácil de penetración de las nanoestructuras es la respiratoria. Dos son las razones centrales. Por un lado, porque, como indican Hoet et al, las nanopartículas menores a 10 micrones de diámetro pueden ser inhaladas y, por el otro lado, puesto que mientras más pequeñas, más profundo entran en los pulmones. Aquellas nanopartículas de menos de 100 nm pueden entrar inclusive a la región alveolar donde se realizan los intercambios de gases a tan sólo 0.5 micrones del torrente sanguíneo. Dadas sus dimensiones, muchas de éstas no son expulsadas sino que se quedan en los tejidos donde el sistema inmunológico procura eliminarlas. Dependiendo de las características físico-químicas de las nanopartículas, el proceso de eliminación –o fagocitosis– puede ser afectado (Hoet et al, 2004).

A pesar de que el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud de los Trabajadores de EUA señale que la inhalación de nanotubos presentes en el aire solo puede ser mínima, sus implicaciones bien pueden ser importantes (Ibid). Un análisis de Warheit y Lam ha demostrado que una vez inoculados los nanotubos de carbono monocapa de modo intratraqueal, éstos generan la formación de granulomas e inflamación intersticial, factores que los hacen mucho más tóxicos que el polvo ultrafino de carbón o de cuarzo (Ibid). De ahí que Hoet et al, (2004) sugieran que para determinar con mayor precisión el

¹⁰ Por ejemplo, nuevas generaciones de microscopios ópticos, de microscopios de efecto túnel, de microscopios electrónicos o de imagen de espectrometría masiva.

¹¹ Un biosensor es un sensor que contiene un elemento biológico –como una enzima– capaz de reconocer o “señalar” (a través de un cambio bioquímico) la presencia, actividad o concentración de una molécula específica en una solución.

¹² Inicialmente denominados “microarrays” o “biochips” y ahora de modo más preciso para el caso de las aplicaciones médicas de diagnóstico como “laboratorios-en-un-chip”. Son una herramienta diseñada para el análisis rápido de hasta las diferencias más mínimas en los códigos genéticos o de la presencia de patógenos y/o moléculas en las muestras (e.g. sangre). Su funcionamiento se basa en la introducción de colecciones de “pruebas génicas” en un portaobjetos o “chip” donde puedan ser expuestas muestras de ADN “desconocido”. Un marcador -fluorescente- indica que alguna de las pruebas coincide con la muestra, es decir, que ésta se ha hibridado o asociado con su contraparte previamente contenida en el chip. Las empresas involucradas en su desarrollo y producción ya ofrecen chips optimizados para usos específicos, por ejemplo para pruebas “escogidas” por los consumidores. Para mayores referencias y una lista de las principales empresas involucradas en su desarrollo. Véase: Gershon, 2005: 1195-1200.

¹³ Especialización en la que se combinan la ciencia de los polímeros, la farmacéutica, la química bioconjugada, la biología molecular y la nanotecnología (ingeniería de nanopartículas). Varias son las nanoestructuras útiles, pero en especial destacan los nanotubos de carbono, los fullerenos y los dendrímeros pues pueden llevar cargas de droga en su interior. Igualmente se puede mencionar aquellas partículas esféricas que pueden ser usadas para el mismo propósito o al ser recubiertas con una película metálica, para su uso terapéutico por medio de termoterapias o magneto-termoterapias. El potencial de las nanoestructuras es que no sólo funcionarían como nuevos mecanismos de entrega de fármacos, sino que previa y simultáneamente como medios de diagnóstico.

nivel máximo de tolerancia a una determinada nanoestructura, tal vez sean más importantes las características específicas de la superficie (en particular la reactividad química y las cargas generadas por el contacto de la nanoestructura con la membrana de las células) que el total de su masa (Ibid). Y es que nótese que la nanotoxicología busca determinar el espectro o rangos de dosis de las nanoestructuras en el que resulten tolerables por el cuerpo humano para desde ahí establecer la viabilidad de su uso. La cuestión es delicada pues resulta verdaderamente complejo determinar lo que se puede denominar como el “umbral de seguridad” de exposición a tal o cual nanoestructura, y más aun, en su caso, de controlarlo en un contexto en el que éstas y otras nanoestructuras están libres en el medio ambiente.

Ken Donaldson, del área de Medicina Respiratoria de la Universidad de Edimburgo, indica al respecto que:
...ya estamos expuestos a nanopartículas de distintos tipos, y ya reconocemos que hay una asociación entre efectos a la salud y las exposiciones...la revolución nanotecnológica puede diseñar partículas químicamente muy distintas a las que ya estamos expuestos y podrían tener diferentes propiedades que las hicieran más dañinas. Debemos estar vigilantes (Kirby, 2004).

En términos de salud, la mencionada toxicidad de las partículas (nano/ultrafinas/finas) se refleja en impactos de malfuncionamiento en el sistema cardiovascular (e.g. arritmia, coagulación) y en posibles afectaciones al sistema nervioso autónomo (Hoet et al., 2004). Ello sugiere que hay una traslocación de las partículas, en un grado u otro, desde los pulmones hacia el sistema de circulación (e.g. a través del propio proceso de fagocitosis o endocitosis) (Hoet et al., 2004; Oberdorster, 2001: 1-

¹⁴ Destacan además de las mencionadas, bioMérieux, UCB, Philips Medical Systems, Siemens AG, Neuropharma, ION-TOF GMBH, Genomita, Gambro, Selex Sensors and Airborne Systems, entre otras. Véase lista de expertos en: Ibid: 2-3.

¹⁵ Ya desde 1926 se sabe que las partículas pueden traslocarse desde el lumen hasta el tracto intestinal por la vía de agregaciones o del tejido linfático intestinal. Por el momento se sabe que mientras más pequeñas sean las partículas más rápido podrían permutarse al mucus y alcanzar los enterocitos colónicos. Desde ahí, éstas pueden penetrar tanto el tejido linfático como los tubos capilares. Según un estudio de Jani et al, partículas de un diámetro de 14 nm se permutan en 2 minutos, las de 415 nm en 30 minutos y las de 1000 nm no pueden traslocarse (en Hoet et al, 2004).

8). El interrogante es cuál es el grado de toxicidad de las nanopartículas una vez que son traslocadas, sea por la vía respiratoria, cutánea o digestiva (por esta vía solamente las pequeñas nanopartículas pueden traslocarse).¹⁵

3.2. POTENCIALES RIESGOS DE LOS (NANO) COSMÉTICOS: LA EXPOSICIÓN CUTÁNEA

La piel es una barrera de unos 10 micrones compuesta de tres capas: la epidermis (células muertas fuertemente queratinizadas), la dermis y el tejido graso subcutáneo. Aunque se cree que el grueso de partículas no logra atravesar siquiera la epidermis (tanto por factores exógenos como endógenos¹⁶), hay señalamientos acerca de que las nanopartículas de menor dimensión potencialmente podrían atravesarla y llegar al sistema circulatorio.

No obstante el desacuerdo científico es mayor pues se dice que las micropartículas de dióxido de titanio empleadas en los bloqueadores solares de rayos UV logran atravesar la epidermis e incluso llegar al fondo de los folículos de pelo; pero ello no es considerado como penetración por autores como Lademann et al. (1999). En contracorriente, Kreilgaard (2004) sostiene que una fracción muy pequeña de micropartículas de dióxido de titanio, sí logran penetrar la piel e interactuar con el sistema inmunológico. Tinkle et al. (2003) igualmente han demostrado que partículas de 0.5 a un micrón pueden ocasionalmente alcanzar la dermis e interactuar con el sistema inmuno-circulatorio.

Sin embargo, de lo que están hablando esos autores es de micropartículas de un solo material, no de nanopartículas de diversa naturaleza. Esta segunda dimensión de la discusión es aún más intensa. Para Hoet et al., es más factible que las nanopartículas penetren la piel que las micropartículas, al tiempo que consideran que dependiendo del material éstas pueden ir a capas más profundas, aunque no hay por el momento contundentes indicaciones de que puedan entrar al sistema circulatorio, a menos que la piel esté dañada de antemano (e.g. acné, heridas, quemaduras, etc.) (Hoet et al., 2004).

Según Colvin, en el caso de nanopartículas de titanio y de óxido de zinc (también usadas en bloqueadores solares), se estima que, aunque aquellas mayores de 40nm difícilmente penetrarían la epidermis, dada su reactividad fotocatalizadora es posible que degraden las propias fórmulas de los bloqueadores una vez expuestas a la luz. Tal proceso, aseguran diversos análisis basados en micropartículas de titanio, daña las moléculas bioló-

gicas pero el efecto no es tan grave en comparación a la exposición solar. El problema es que los estudios para partículas menores de 100 nm no existen (Colvin, 2003). Aun así, Advanced Nanotechnology (Australia) y Oxonica (Inglaterra) sostienen que sus productos son fotoestables (Miller, 2006).

En medio de este controversial escenario en el que los resultados se contradicen, son inconclusos o incluso en el que aún no hay investigación, Paul Borm del Centro de Excelencia en Ciencias de la Vida (Holanda) sostiene:

...estamos tratando de encontrar una explicación de por qué pequeñas cantidades de partículas... pueden tener esos tremendos efectos. La gente [los investigadores] está tratando de encontrar la bala mágica. Algunos dicen que son los metales en las partículas, otros que son los agentes y un enorme grupo dice que son las nanopartículas en sí mismas. Esto último es una atractiva teoría, pero se necesita mayor investigación (en Helland, 2004).¹⁷

En el caso concreto de los potenciales riesgos del uso de nanoestructuras en cosméticos, el proyecto NanoDerm, financiado desde el programa RTD de la Comisión Europea, sugiere colocarse en dicha dirección, pero hasta mediados de 2007 ni siquiera se había dado a conocer el más mínimo avance sobre sus actividades¹⁸

Lo llamativo entonces es que ya se encuentran en el mercado numerosos productos de cosmética que hacen uso de nanopartículas. Según el Grupo de Trabajo en Medio Ambiente (EUA), de los cerca de 10500 ingredientes que se utilizan en la industria de los cosméticos, tan sólo el 11% ha sido estudiado por paneles de expertos de la propia industria.¹⁹ En lo que respecta a nanoestructuras, no se sabe con exactitud cuántos ingredientes realmente las contienen y cuantos más

bien tienen micro-moléculas. Tampoco queda del todo clara la consistencia de su uso, aunque L'Oreal parece colocarse a la vanguardia con docenas de nanosomas patentados y un gasto en nanotecnología de alrededor de unos 500 millones de euros (Rogers, 2005). Pero ciertamente no es la única.

Una revisión de los productos que están en el mercado y que abiertamente declaran hacer uso de nanoestructuras realizada, por un lado, por el Centro Internacional Woodrow Wilson para Académicos²⁰ y, por otro lado, por Amigos de la Tierra (Miller, 2006), indica que entre los cosméticos se incluyen marcas, además de L'Oreal (nanosomas), a: Chanel, Johnson & Johnson, Procter & Gamble, Revlon, Lancome, Clinique (nanopartículas y nanocápsulas); Eternalis, Hawaiian Tropic y NuCelle (nanopartículas); Zelens (buckyballs); BioNova Cosmetics (nano y pico partículas), entre muchas otras.²¹

El debate fuera de la esfera de los impulsores de la nanotecnología es realmente tenso ya que, en este caso, la comunidad de la industria de los cosméticos sostiene que sus productos son seguros (aunque no revelan los resultados de ningún estudio que lo avale). Por ejemplo, John Bailey de la Cosmetic, Toiletry and Fragrance Association (EUA) indicó que aunque aún son pocos los productos que usan nanopartículas,

...desde luego dentro de las leyes de cosméticos ya hay suficientes revisiones y balances que asegurarán que los productos y sus ingredientes sean seguros (Boyce, 2006).

No obstante, es sabido que la Administración de Drogas y Alimentos de EUA (FDA, por sus siglas en Inglés) generalmente sólo investiga los cosméticos si surgen cuestionamientos sobre su seguridad una vez que ya están en el mercado, puesto que no hay ningún proceso de aprobación previo a la comercialización de fórmulas de cosméticos (Ibid). Tampoco existe la regulación en ningún país del mundo en el que se exija el etiquetamiento de los productos que contengan nanoestructuras (Miller, 2006).

La situación es concebida por Friends of the Earth del siguiente modo:

...en uno de los más dramáticos fallos de regulación

¹⁶ Entre los endógenos vale mencionar la edad de la piel, la constitución anatómica del sitio de aplicación, el control homeostático, etc. Entre los exógenos: la dosis, el vehículo de aplicación (líquido, sólido) o la reactividad proteica.

¹⁷ Por ejemplo, Eva Oberdörster sostiene que los puntos cuánticos serán altamente tóxicos porque están hechos de metales. Lo mismo sugiere con el caso de los fullerenos que son activos a la reducción-oxidación, diseñados para ser catalizadores (en Helland, 2004: 25).

¹⁸ Véase: www.uni-leipzig.de/~nanoderm/

¹⁹ Véase: www.cosmeticsdatabase.com/research/whythismatters.php?nothanks=1

²⁰ Véase en: www.nanotechproject.org/44/consumer-nanotechnology

²¹ Para una búsqueda de los grados de preocupación de los ingredientes de los cosméticos (nanos o no), véase la página electrónica "Skin Deep" del Environmental Working Group (EUA): www.ewg.org/reports/skindeep2/

desde la introducción del asbesto, las corporaciones en todo el mundo están rápidamente introduciendo miles de toneladas de nanomateriales en el medio ambiente y en las caras y manos de millones de gentes a pesar del creciente cuerpo de evidencia que indica que los nanomateriales pueden ser tóxicos para los humanos y el medio ambiente (Ibid: 2).

Dicho de forma más mesurada, como las palabras del premio Nobel en química (1996) Robert Curl, quien co-descubriera los fullerenos y expresara:

...yo tomaría un camino conservador tratando de evitar usar los cosméticos. Mientras tanto, hay que conservar el juicio en los verdaderos méritos o desméritos de su uso (Halford, 2006).

Consecuentemente, ocho grupos entre los que están Amigos de la Tierra y el Centro Internacional de Evaluación Tecnológica presionaron en mayo de 2006 para un fortalecimiento de las regulaciones estadounidenses entorno a los cosméticos que incluyen nanoestructuras.²²

El llamado a ser precavidos, independientemente de su modalidad (e.g. revisión-regulación, moratoria, prohibición), sin duda debería ser extendido a nivel internacional pues se corre el riesgo de caer en lo que se califica como una lección tardía de alerta temprana) (European Commission, 2001).

No obstante, movida por un optimismo tecnológico poco meditado, la CE aseguraba en 2004 que:

...los riesgos parecen ser controlables...sabemos ya que algunas nanopartículas no son dañinas a la salud. Por eso se utilizan en las cremas de protección solar como factor de protección contra la luz o se mezclan con otros materiales a los que van enlazadas de manera que el usuario ni siquiera entra en contacto con ellas. La industria también está aplicando las medidas de seguridad adecuadas para evitar cualquier riesgo sanitario a sus clientes o empleados (European Commission, 2004).

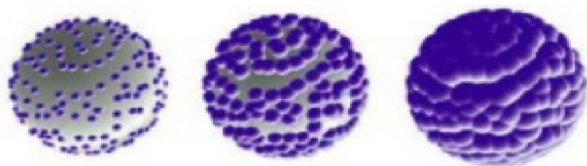


Figura 3. Formación de una nano-cáscara.

²² Lisa Archer de Friends of the Earth era contundente en su declaración a la prensa al señalar que, "...las corporaciones deberían de detener la comercialización de nano productos hasta que esos (nano)materiales sean probados seguros y dejar de amenazar a sus clientes como conejillos de indias." (Pitman, 2006).

Los estudios o regulaciones a las que pudiese estarse refiriendo la Comisión hasta julio de 2007 eran, a saber, públicamente desconocidos.

3.3. IMPLICACIONES DEL USO DE NANOPARTÍCULAS EN LA MEDICINA: EL CASO DEL TRATAMIENTO DEL CÁNCER

De entre las nanoestructuras con mayor potencial para su uso en la medicina están aquellas asociadas al tratamiento del cáncer; tal vez el negocio médico más rentable y cuya cura, según Murphy y Topel, podría valer los 50 billones de dólares (trillions en Inglés) (Murphy y Topel, 2005).

Destacan aquí las nanoshells (o literalmente nano-cáscaras), estructuras compuestas por una parte central de un material no-conductivo (e.g. sílice) que es cubierta por una delgada capa metálica, de ahí que parezcan pequeños granos.

El Instituto Nacional del Cáncer de EUA (NCI) explica que a través de manipular el tamaño de la parte central y el espesor de las cubiertas metálicas, estos granos pueden absorber longitudes de onda de luz específicas, siendo las más útiles aquellas capaces de absorber luz cercana a la infrarroja que puede penetrar fácilmente varios centímetros de tejido humano. La absorción de la luz por las nanoshells genera un calor que es letal a las células, de tal suerte que los científicos creen que se pueden usar eficazmente de modo que éstas busquen los blancos cancerígenos para luego aplicar luz cercana a la infrarroja. En cultivos de laboratorio, se informa, el calor generado por estas nanoshells absorbentes de luz ha matado exitosamente las células cancerígenas mientras que deja intactas las células sanas vecinas (NCI, sin fecha).

Esta novedosa aplicación de nanoshells de oro o "nanopartículas inteligentes", tiene grandes limitantes que se están tratando de superar. Entre tantas están las interacciones de las "nanopartículas inteligentes" con las nanopartículas orgánicas del cuerpo, pues una cosa es llevar los experimentos en laboratorios y otra muy distinta dentro del cuerpo humano con toda la complejidad del mismo. Ferrari M. Casanova, asesor en aplicaciones nanotecnológicas del NCI, lo expresaba en los siguientes términos:

...un problema típico con las nanopartículas, incluso las seguras -claro, uno puede asumir que hay tóxicas, pero esas no son de las que uno quiere hablar- es que típicamente consiguen ser contenidas por el proceso

de secuencia del sistema inmunológico, donde son envueltas y luego eliminadas por los macrófagos...por tanto, incluso si son buenas partículas y no son tóxicas, éstas no hacen nada a menos que uno quiera atacar los macrófagos, y si es así entonces uno es afortunado. Pero, si lo que se quiere es apuntar a algo más, desde luego se tiene que encontrar la manera de sobrellevar el proceso de secuestro [de los macrófagos] (Casanova, 2003).²³

Portanto, precisa Casanova:

...hay un paradigma tecnológico en esa exposición porque los lisosomas son utilizados para que sean secuenciados rápidamente a minutos de la inyección, momento en el que deben enfrentar la circulación por días. Si aún están ahí ya es un éxito. Entonces el problema con las nanopartículas es que ya no pueden ser apuntadas o dirigidas (Casanova, 2003).²⁴

La cuestión central sugiere ser el tamaño de la nanopartícula puesto que se ha demostrado que si éstas son muy pequeñas, bien pueden esquivar el proceso de fagocitosis y consecuentemente acumularse en los tejidos (pulmones, hígado, riñones) o bien, entrar al sistema circulatorio (Renwick et al., 2001: 119-127; Sin autor, 2006-A). Partículas como los nanotubos de carbono,

dada su propensión a 'amontonarse', pueden ser peligrosas si entran al torrente sanguíneo, factor al que se le suma su plausible toxicidad. Aún más, la posibilidad de que las nanopartículas atraviesen la placenta y lleguen al feto es algo que se ha demostrado en el caso de experimentos con ratas (Wootliff, 2004). Especulaciones sobre sus efectos en el caso del ser humano apuntan a la posibilidad de que las nanoestructuras puedan dañar los genes a través de su penetración en las células, depositando sustancias activas y produciendo daños por oxidación. Su posibilidad se corroborará conforme se consoliden las terapias génicas que hacen uso de nanoestructuras para inyectar genes dentro de las células, como lo proponen las denominadas terapias de "nanopartículas antisentidos", que son usadas para regular/bloquear la reproducción de células determinadas (por ejemplo, a través del boqueo del ARN-mensajero mediante el uso de ADN-antisentidos que previenen que el mensajero se convierta en proteína) (Rosi et al., 2006).

Dicho riesgo, entre otros seguramente, es un conflicto propio de las terapias contra el cáncer que pretenden hacer uso de nanoshells de oro (termoterapia) y/o de nanoestructuras 'inteligentes' de entrega de fármacos por blanqueo (dígase quimioterapia personalizada y selectiva). Así parece confirmarlo Casanova cuando expresaba acerca del destino de las nanopartículas una vez dentro del cuerpo que,

...si observas el caso de los lisosomas, está bien. Éstos son metabolizados de modo regular. El carbono y el oxígeno no son problema, pero si observas cualquier otra cosa pues será muy difícil que las partículas sean completamente biodegradables...tal vez las partículas sólido-lípidas puedan estar en buena dirección y eso es algo en lo que estamos trabajando. Para cualquier otro tipo de partículas no parece fácil alcanzar una funcionalidad. Sólo basta con ver las partículas de silicón o de óxido ferroso que hay ahí afuera...estas nanoshells de oro o de otros metales...bueno son muy excitantes pero se van a quedar ahí...Así que, la pregunta que uno debe confrontar es: ¿Quieres un cáncer que te va a matar en seis meses o vas a estar viviendo bien con una cierta concentración de nanopartículas de metal en tus pulmones que te van a permitir vivir, digamos 5 años más? Y

²³ Lo indicado se debe a que, como es lógico, toda respuesta inmunológica incluye dos fases: una en la que el huésped debe identificar el patógeno como invasor, y otra, en la que debe movilizar todos los recursos para destruirlo, aislarlo y/o eliminarlo. En el proceso, los lisosomas juegan un rol central pues son componentes celulares altamente ácidos (pH de 5) que contienen una gran cantidad de enzimas hidrolíticas que sirven para degradar diferentes tipos de sustancias. Así, cuando un elemento extraño (dígase, nanopartículas) entra al organismo, éste se va a enfrentar con diversas barreras biológicas importantes como los lisosomas que, con su pH ácido y sus diferentes enzimas específicas, potencialmente destruyen a tal ente (nanopartícula) y su posible carga –caso de las nanoestructuras pensadas para la 'entrega de fármacos' (por eso es importante que las nanopartículas de entrega de fármacos sean resistentes a los diferentes pH del organismo y también a las enzimas). Los lisosomas son, por tanto, como recicladores del material que degradan, al tiempo que limpian y eliminan en -cierto grado- los desechos que no van a ser reciclados. Entonces, cuando Casanova habla de los macrófagos, se está precisamente refiriendo a un conjunto de células compuestas por muchos lisosomas que se encargan de ejecutar lo que se denomina como respuesta celular que se combina, de ser necesario, con la respuesta humoral (la producción de anticuerpos –proteínas- que ingesta las partículas extrañas o invasoras y que a su vez, también, están compuestas de lisosomas).

²⁴ La incertidumbre del asunto es considerable. Llama la atención que Naomi Halas, involucrada en la investigación de nanoshells de oro y en su comercialización, contradiga tal señalamiento al afirmar que éstas, "...no disparan una respuesta inmunológica" (Stuart, 2003).

²⁵ Respuesta en sesión de preguntas y respuestas.

es que el asunto es que, en la medicina, todo es un dar y tomar, das algo y pierdes algo. La pregunta real va a ser una decisión clínica sobre qué precio está uno dispuesto a pagar por el beneficio que las nanopartículas están ofreciendo (Casanova, 2003).²⁵

Entonces, las nanopartículas metálicas como las nanoshells de oro, tienen dos problemas nodales. Uno 'técnico' que tendrá que ser principalmente aclarado por los especialistas y, resuelto o no en los laboratorios (e.g. mediante cubiertas ad hoc que aminoren o neutralicen la toxicidad de las nanoestructuras –si es que eso es realmente viable); y otro de carácter económico, social y ético-moral sobre la comunicación médico-paciente acerca de toda la amplitud de posibles beneficios y riesgos de tales o cuales diagnósticos, terapias y fármacos así como de las posibles alternativas de tratamiento, sean éstas alópatas o alternativas.

Nótese que esta última dimensión, la social, es de trascendencia pues mientras la primera está prácticamente y en gran medida definida por parámetros físico-químico-biológicos, la segunda, depende más de aspectos relativos a relaciones sociales, la ética y la moral del negocio de la oncología.

Vale preguntarse entonces cuáles son los criterios con los que se harán los estudios de riesgo sobre las nanoestructuras de uso médico en medio de una fuerte competencia y con la presencia de fuertes incertidumbres; cómo se promoverá su uso hacia adentro de la comunidad médica y hacia fuera de ella; o hasta qué punto se comunicará a los pacientes todas las implicaciones de su uso y el grado de incertidumbre de las mismas (la cuestión clínica). Es un contexto en el que Mark Welland, del Centro de Nanociencia de la Universidad de Cambridge, advierte que, "...en la aloca-

da carrera por capitalizar la nanociencia y la nanotecnología, la calidad y el rigor científico seguramente sufrirán" (Delgado, 2006). Y aún más, en el que, como suscribe Didier Theron (del Instituto de Electrónica, Microelectrónica y Nanotecnologías., CNRS, Francia), "...la competencia por los logros industriales posiblemente incrementará el riesgo de engañar" (Ibid).

El asunto no es para menos, pues los intereses de la NanoMedicina ya confluyen un gran número de actores, tanto de la esfera de científicos e ingenieros como del sector privado e incluso de algunos abogados al desarrollo de armamento.²⁶

La prisa y el estímulo por la comercialización de las nanopartículas de oro, así como de otras aplicaciones nanomédicas, es notoria. La Dra. Halas, por ejemplo, fundó para tal propósito Nanospectra LLC en el año 2000, ente que fuese reconfigurado en 2001 como Nanospectra Biosciences (EUA). En 2003, Nanospectra Biosciences recibía un grant del DdD por 3 millones de dólares para que desarrollara terapias cancerígenas usando nanoshells, (ahora denominada Terapia AuroLáser dado que usa nanoshells que fueron desarrolladas en 1990 en la Universidad de Rice y que fueron patentadas bajo la denominación de AuroShell); todo a la par de financiamiento de la NSF, las oficinas de la Armada, la Marina y la Fuerza Aérea de EUA (Stuart, 2003). Las pruebas de tales nanopartículas para el tratamiento de cáncer comenzaron en el 2006.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Conviene preguntarse, hasta qué punto vale la pena correr los riesgos de abrir una potencial caja de Pandora de la nanotecnología y a qué costo (actual y futuro), sobre todo en un panorama en el que buena parte de la investigación, a decir de la Dra. Dehmer, de la Office of Basic Energy Sciences del Departamento de Energía de EUA, está centrándose en un gran reto:

...tomar diferentes tipos de nanoestructuras en las que la naturaleza no ha pensado, ponerlas juntas en diversas

²⁶ Nanosphere (EUA), una compañía nanobiotecnológica, precisa que lo que interesa al ejército es el uso de los de nano-racimos de oro sensibles a la detección selectiva de ADN de la compañía para la detección de patógenos como el ántrax. Sin embargo, uno puede especular que el Pentágono puede estar igualmente interesado en el empleo de la tecnología de identificación selectiva de ADN de manera ofensiva a través del uso de nanopartículas portadoras de agentes altamente tóxicos (e.g. ántrax) y/o para mejorar el sistema de su dispersión. Además, vale notar que si logran desarrollar este último tipo de nanoestructuras, es lógico que su detección en agua y aire será muy difícil pues lo que se detectaría sería su cubierta externa o coating. El conocimiento sobre cómo éstas son asimiladas en el cuerpo humano y cuáles son las reacciones inmunológicas que generan es fundamental para dicho propósito. ¿Será por eso que el Pentágono financia investigaciones sobre el empleo de nanoshells de oro para tratamientos de cáncer?

²⁷ Martin Schmid, administrador de la división de nanotubos de carbono de Bayer Material Science AG (Alemania), señalaba al respecto de los tipos y montos de materiales empleados en la producción de nanotubos multicapa (denominados por la empresa Baytubes) que eso es información confidencial. Lo único que se puede saber es que se hacen uso de cantidades indefinidas de gases de hidrocarburo, gases inertes y catalíticos.

formas de modo que podamos hacer cosas que la naturaleza no ha hecho y, en particular, hacer cosas que sean más robustas que los sistemas naturales (US Senate, 2003).

Y es que la potencial y eventual “minimización” de los efectos de una tecnología dada en el largo plazo—por la vía del propio desarrollo tecnológico no parece ser conveniente pues las consecuencias de nuestras decisiones actuales marcarán y tendrán que ser resueltas (o no) por las generaciones futuras, si es que nuestros cálculos sobre el avance tecnológico fueron correctos y si nuestra dimensión de precaución sobre la amplitud de los efectos fue “adecuada”.

Sarewitz y Woodhouse observan que,

...resulta una sorprendente ironía de la innovación tecnológica que a pesar de aplicar toda nuestra inteligencia racional al corto plazo, debemos confiar nuestro bienestar de largo plazo a la esperanza de que las buenas consecuencias imprevistas de nuestras invenciones contrapesen las malas. En la medida en que la potencia de nuestras tecnologías continúa acelerándose, esto parece más que imprudente (Sarewitz y Woodhouse, 2006: 158).

Así pues, en el caso de las nanoestructuras se han de realizar estudios sobre su reactividad per se y sus interacciones con el medio ambiente, no sólo inmediatas y reducidas a espacios determinados, sino también en el largo plazo y en una situación de saturación ambiental global con diversas nanopartículas pululando y potencialmente reactivas. Las aproximaciones del flujo de los nanomateriales desde la perspectiva de la Ecología Industrial pueden ser de gran ayuda para tal propósito. Lo

mismo, sucede en relación a la salud humana, pues la investigación preventiva no sólo debe enmarcarse entorno a análisis nanotoxicológicos (exposición inmediata) sino a las potenciales implicaciones de largo plazo que se podrían presentar por una convivencia permanente con esas nanoestructuras (dígase potenciales modificaciones genéticas hereditarias). Pero, para ello es imprescindible que fluya la información sobre lo que está sucediendo en los laboratorios y centros de producción (e.g. tipos y cantidades de materiales empleados y desechos generados, etc.). Y es que mucha información necesaria para tales estudios de flujos de nanomateriales se considera confidencial bajo criterios como el secreto industrial y, en ciertos casos, como un asunto sensible por sus posibles implicaciones entorno al avance y consolidación de la comercialización de la nanotecnología.²⁷

El asunto no es cualquier cosa pues la incertidumbre e implicaciones de lo que la Comisión Europea califica como la creación de una “segunda naturaleza” (Nordmann, 2004), sugieren ser de orden mayor. Se trata de un frente tecnológico, que si bien es cierto, coloca en gran medida las implicaciones futuras en el ámbito de lo incierto, no por ello deja de ser más o menos riesgoso.

Por tanto, son imprescindibles revisiones valorativas a fondo que eviten soluciones unidimensionales y tecnológicamente optimistas, al tiempo que se toma nota, detenidamente y en toda su amplitud espacio-temporal, de las particularidades de tales o cuales casos. Así, con este tipo de ejercicios de reflexión se pueden visualizar con más amplitud los posibles costos de las decisiones tomadas hoy, quiénes pagarían ese costo ahora y en las generaciones futuras y quiénes recibirían tal o cual beneficio (potencial o real). No es más que teniendo clara la complejidad del asunto tanto en el corto como en el mediano y largo plazo que se pueden tomar decisiones más responsables, aunque no necesariamente correctas; y más aún, socialmente concertadas (con la siempre compleja cuestión de cómo tomar en cuenta “las opiniones” de las generaciones futuras).

Por lo pronto, en la coyuntura de toma de decisiones y del inevitable manejo (o no) del riesgo y del peligro e independientemente de la manera en la que éstos sean gestionados (pro-activa y/o reactivamente, ya sea en el “aquí y el ahora” o en el “hoy, aquí, el mañana y allá”), Andrew Maynard sugería a principios de 2006 que los gobiernos y la industria debían incrementar su gasto en investigación sobre los peligros ambientales y a la salud de las nanotecnologías pues de los 9 millardos de dólares que se gastan a nivel mundial en I+D nanotecnológico, solamente son destinados a ese tipo

²⁸. Datos incompletos de Rejeski vertidos ante la Cámara de Representantes de EUA en 2005 hablan de un monto de unos 23 millones de dólares en más de 150 proyectos en medioambiente, salud y seguridad de las nanotecnologías en 8 agencias distintas en EUA, Canadá y la Unión Europea (Rejeski, 2005). En relativo acuerdo con los datos de Maynard y Rejeski, la EPA confirma que desde 2001 ha financiado 39 proyectos para el desarrollo de nanotecnologías de prevención de polución por un monto de 11 millones de dólares y 32 más para indagar en los potenciales impactos e implicaciones por una cifra de 10 millones (EPA, 2005: 13-4). Esto sugiere que en 5 años la EPA ha destinado en promedio poco más de 4 millones de dólares anuales, de los cuales sólo 2 son específicamente para potenciales peligros. En otras palabras, si tomamos nota de que en los últimos dos años el presupuesto oficial total en nanotecnología desde la NNI ronda el millardo de dólares, entonces el gasto en investigación sobre los potenciales peligros medioambientales no supera el 0.2% del gasto total anual.

de investigaciones entre 15 y 40 millones por año. Es suficiente? Cuestionaba Maynard al tiempo que respondía: "...bueno, creo que eso depende de que tan serios somos en cuanto al desarrollo de nanotecnologías seguras" (Sin autor, 2006).²⁸

Este señalamiento ya había sido puesto sobre la mesa desde antes por ETC Group, cuando advertía en 2004 que debido a que las aplicaciones y las implicaciones están mezcladas en el 11% del presupuesto gubernamental de EUA en "Investigación Nanotecnológica en Salud y Medio Ambiente", es realmente difícil saber que tanto del financiamiento es destinado a determinar el riesgo y la toxicidad y que tanto al desarrollo de productos para ser utilizados en el medio ambiente o la medicina (ETC Group, 2004-B).

No es casual que David Rejeski, director del proyecto en Nanotecnologías Emergentes del Woodrow Wilson International Center for Scholars, señalara en una audiencia ante la Cámara de Representantes (EUA) que,

...necesitamos una completa y transparente revelación de todas las investigaciones en medioambiente, salud y seguridad que están siendo financiadas por el gobierno –de todos los proyectos, no solamente la suma monetaria de éstos. Ello nos permitirá identificar los vacíos, mejorar la asociación con la industria y con otros países para llenar esos vacíos y, al margen, estratégicamente invertir o *desinvertir* (Rejeski, 2005. Énfasis personal).

Y agregaba correcta, pero un tanto deterministamente, que:

...estaremos enfrentándonos con riesgos nanotecnológicos por décadas. Estos riesgos serán más complejos conforme lo nano y la biotecnología converjan y no menos... Debemos prepararnos para lo inesperado. La nanotecnología está planeada para ser disruptiva por lo que no es algo en lo que debiéramos ser engreídos o sobreconfiados (Ibid).

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American National Standards Institute (2005). ISO Nanotechnologies TC 229 Meets in London: ANSI News and Publications. Nueva York.

Arnall, A. (2003). Future Technologies, Today's Choices. Greenpeace Environmental Trust. Londres, Julio.

Boyce, N. (2006). Safety of Nano-Cosmetics Questioned, Health & Science. EUA, 16 de mayo.

Casanova, Ferrari M. (2003). The Cancer Nanotechnology Plan, Presentación en el Euro Nano Forum 2003. Trieste, Italia., 11 de Diciembre.

Colvin, V. (2003). The potencial environmental impact of engineered nanomaterials. Nature Biotechnology. No. 21. EUA.

Colvin, V. (2002). Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News, EurekAlert! Nanotechnology In Context. Noviembre.

Delgado, G. C. (2006). Nano Conceptions: A Sociological Insight of Nanotechnology Conceptions, The Journal of Philosophy, Science and Law. Volume 6. EUA, 1 Julio.

Delgado, G. C. (2002). La Amenaza Biológica: mitos y falsas promesas de la biotecnología. Plaza y Janés. México.

Department For Environment, Food and Rural Affairs (2005). Characterising the Potential Risks Posed by Engineered Nanoparticles. UK Government. Londres.

EPA - Environmental Protection Agency. (2002). EPA Nanotechnology and the environment: Applications and Implications. Washington, EUA. Agosto.

EPA - Environmental Protection Agency. (2005). Nanotechnology White Paper. EPA's Science Policy Council. EUA.

ETC Group. (2003). The Big Down: From Genomes to Atoms. Canadá.

ETC Group. (2004-A), Nanotech Advancing in Legal Vacuum, ETC Group News Release. Canadá. 30 de Junio.

ETC Group. (2004-B). Nanotech News in Living Colour: An Update on White Papers, Red Flags, Green Goo, Grey Goo Communique. No. 85. Canadá. Mayo/Junio.

European Commission. (2001). Lecciones tardías de alertas tempranas: el principio precautorio, 1896-2000. European Environment Agency. Bélgica

European Commission. (2004). La nanotecnología. Innovaciones para el mundo del mañana. Bélgica.

European Commission. (2005). European Technology Platform on NanoMedicine: Vision Paper and Basis for a Strategic Research Agenda for NanoMedicine. Bélgica, Septiembre.

European Commission. (2006). Nanomedicine, Nanotechnology for Health. European Technology Platform. Strategic Research Agenda for Nanomedicine. Bélgica. Noviembre.

- Feder, B. (2004). Health Concerns in Nanotechnology. The New York Times. EUA, 29 de Marzo.
- Gershon, D. (2005). "DNA microarrays, More than than gene expression, Nature. Vol. 437. No. 7055. 20 de Octubre.
- Halford, B. (2006). Fullerene For The Face: Cosmetics containing C60 nanoparticles are entering the market, even if their safety is unclear". Chemical & Engineering News. Vol. 84. No. 13. EUA, 27 de Marzo.
- Helland, A. (2004). Nanoparticles: A Closer Look at the Risks to Human Health and the Environment. International Institute for Industrial Environmental Economics. Tesis de Maestría. Suecia, octubre.
- Hett, A. (2004). Nanotechnology: Small Matter, Many Unknowns. Swiss Reinsurance Company. Suiza.
- Hoet, P., Brüske-Hohlfeld, y Salata O. (2004). Nanoparticles – Known and Unknown Health Risks Nanobiotechnology. Vol. 2. No. 12. EUA.
- KIRBY, A. (2004). Tiny particles threaten brain. BBC News. Londres, 8 de Enero.
- Kreilgaard, M. (2002). Influence of microemulsions on cutaneous drug delivery. Advance Drug Delivery Reviews. No. 54.
- Lademann, J., Weigmann, H., Rickmeyer, C., Barthelmes, H. Schaefer, H., Mueller, G., Sterry, W (1999). Penetration of Titanium dioxide microparticles in a sunscreen formulation into the horny layer and the follicular orifice. Skin Pharmacology and Applied Skin Physiology. No. 12.
- Lovern, S. y Kapler, R. (2006). Daphnia Magna Mortality When Exposed to Titanium Dioxide and Fullerene (C60) Nanoparticles. Environmental Toxicology and Chemistry. Vol 25. No. 4. EUA.
- Miller, G. (2006). Nanomaterials, Sunscreens And Cosmetics: Small Ingredients, Big Risks. Friends of the Earth. Australia/EUA, Mayo.
- Murphy, K. y Topel R. (2005). The Value of Health and Longevity, National Bureau Economic Research Working Paper. No. 11405. EUA, Junio.
- Nci – National Cancer Institute (sin fecha). Nanotechnology in Cancer: Tools to Relieve Human Suffering. Página del NCI. EUA.
- Nordmann, Alfred –rapporteur. (2004). Converging Technologies – Shaping the Future of European Societies. Comisión Europea. Bruselas.
- Oberdorster, Eva (2004). Manufactured nanomaterial (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass, Environmental Health Perspectives. Vol. 12 No. 10. EUA.
- Oberdorster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W., and Cox, C (2004). Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. Inhalation Toxicology No.16. EUA.
- Oberdorster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Lunts, A. et al (2002). Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats. Journal of Toxicology and Environmental Health. A 65 EUA.
- Oberdorster, G. (2001). Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. International Archives of Occupational and Environmental Health. No. 74.
- Pitman, S. (2006). Lobby groups question cosmetic nanoingredients, Cosmetics Design.com EUA, 18 de Mayo.
- Rejeski, D. (2005). Environmental and Safety Impacts of Nanotechnology: What Research is Needed. Pronunciamiento ante el Comité de Ciencia de la Casa de Representantes. EUA, 17 de noviembre.
- Renwick, C., Donaldson, K., y Clouter, A (2001). Impairment of alveolar macrophage phagocytosis by ultrafine particles. Toxicology and Applied Pharmacology. No. 172.
- Roco, M. (2005). Responsible of Nanotechnology. Environmental Science & Technology. EUA, 1 de marzo.
- Roco, M. y Bainbridge, W. (2001). Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. National Science Foundation. EUA, Marzo.
- Roco, M. y Bainbridge, W. (2003). Nanotechnology: Societal Implications, Maximizing Benefits For Humanity. National Nanotechnology Initiative. EUA, 3-5 de Diciembre.
- Rosi, N.L., Giljohann, D.A., Thaxton, C.S., Lytton-Jean, A.K., Han, M.S., Mirkin, C.A (2006). Oligonucleotide-modified gold nanoparticles for intracellular gene regulation. Science. Vol 312. No. 5776.
- Royal Society. (2004). Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. Reino Unido.
- Sarewitz, Daniel y Woodhouse, Edward (2006). Lo pequeño es peligroso en, Foladori, Guillermo e Invernizzi, Noela (coord). Nanotecnologías Disruptivas. Impactos Sociales de las Nanotecnologías. Porrúa. México.
- Stuart, C. (2003). Gold Metal Aspirations, Small Times. Vol 3. No. 6. EUA.
- Tinkle, S, A., J.M., Rich, B.A., R., J.R., Salmen, R., DePree, K., Adkins, E.J (2003). Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. Environmental Health Perspectives. No. 111.
- Tomellini, R. Roco, M. (2002). Nanotechnology Revolutionary Opportunities and Societal Implications. European Commission. Bélgica, Febrero.