

Ensayos

¿Se estudian los riesgos de los nanomateriales en México?

Resumen

Este artículo evalúa hasta qué punto se estudian los riesgos de los nanomateriales para la salud humana y el medio ambiente en México. El artículo se despliega en cuatro secciones. La primera ilustra las implicaciones de los riesgos de las nanopartículas y nanomateriales a los trabajadores, consumidores y el medio ambiente. Posteriormente se realiza una revisión del estado de desarrollo de las nanotecnologías en México. Después se plantea una descripción de la metodología empleada, la cual se fundamentó en dos técnicas: la primera implicó la creación de una base de datos que contiene todos los artículos científicos sobre nanotecnologías publicados por autores mexicanos durante un período de 12 años, y a partir de esa base de datos se utilizaron términos para identificar aquellos asociados a investigaciones sobre los riesgos de los nanomateriales; la segunda técnica implicó una búsqueda manual en Internet para identificar a todos los investigadores que trabajan en esta área en los distintos laboratorios, centros de investigación y universidades del país. Concluimos que el tema de los riesgos de las nanotecnologías está generalmente ausente de las investigaciones en México.

Abstract

The aim of this article is to explore the extent to which the health and environmental risks of nanomaterials are researched in Mexico. The article consists of four sections. The first section illustrates the implications of the risks that nanoparticles and nanomaterials pose to workers, consumers and the environment. Next, the state of the development of nanotechnologies in Mexico is reviewed. This is followed by a description of the methodology employed, which is based on two techniques: the first involved the creation of a data base that contains every scientific article on nanotechnology published by Mexican authors over a period of 12 years. From this data base, key words were used to identify those associated with research on nanomaterial risk. The second technique involved a web-based internet search to identify all the researchers who work in this field in various laboratories, research centers and universities within the country. We conclude that the topic of nanotechnology risk is generally absent from research in Mexico.

Résumé

Cet article évalue jusqu'à quel point on étudie les risques des nanomatériaux sur la santé et sur l'environnement au Mexique. Ce thème est exposé en quatre parties. D'abord, on illustre les implications des risques des nanoparticules et des nanomatériaux sur les employés, les consommateurs et l'environnement. Ensuite, on analyse le développement des nanotechnologies au Mexique. Puis, on décrit la méthodologie utilisée qui s'appuie sur deux techniques: la première implique la création d'une base de données qui contient tous les articles scientifiques publiés par des auteurs mexicains sur les nanotechnologies sur 12 ans et à partir de ces données, on a utilisé des termes pour identifier les articles ou auteurs associés à des recherches sur les risques des nanomatériaux. La deuxième technique consiste en une recherche sur internet pour identifier tous les chercheurs qui travaillent dans ce domaine dans différents laboratoires, centres de recherches et universités du pays. En conclusion, le thème des risques des nanotechnologies est généralement absent des recherches au Mexique.

Edgar Záyago Lau¹, Guillermo Foladori¹, Stacey Frederick², Edgar Arteaga Figueroa¹

Palabras clave: Análisis de riesgos; Investigación nanotecnológica; México; Nanomateriales.

Introducción

México, después de Brasil, es el segundo país en Investigación y Desarrollo (I+D) en nanotecnologías en América Latina, (Robles-Belmont 2012; Kay and Shapira 2009; OICTel, 2008).¹ Según indicadores bibliométricos, México ha publicado cerca de 4 500 artículos científicos sobre nanotecnología entre 2000 y 2012 (Záyago Lau, Frederick, y Foladori, 2014). El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ha proyectado

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, Mexico.

²Universidad de Duke, Estados Unidos de América

datos de una encuesta en la que calcula que existirían 188 empresas que trabajan con, y/o investigan en, nanotecnología en el país (INEGI, 2013). A inicios del presente siglo, el gobierno mexicano ha fortalecido el desarrollo de las nanotecnologías como un área estratégica para lograr incrementar la competitividad económica. Entre los esfuerzos por incentivar esta área se tiene la creación de una Red Nacional de Nanociencias y Nanotecnologías, la construcción de dos laboratorios nacionales y la inauguración de parques industriales especializados en nanotecnologías (Zárago Lau y Foladori, 2010). No obstante, no existe una institución que dé seguimiento al tema, para conocer cuáles son las líneas de investigación prioritarias, qué instituciones están asociadas, cuántos recursos se emplean, y otros datos que ayuden a la orientación del área. Tampoco existe un marco regulatorio que estipule normas para las investigaciones y/o la comercialización de los productos derivados de las nanotecnologías.²

El objetivo de este artículo es evaluar la existencia de investigaciones sobre riesgos de los nanomateriales a la salud humana y/o el medio ambiente en México. Para este propósito se ha realizado una investigación bibliométrica, acompañada de una revisión manual e individualizada de la información que publican en Internet los principales centros de investigación públicos y privados que trabajan con las nanotecnologías. El resultado al que hemos llegado es que la temática de riesgos está prácticamente ausente de la agenda de investigación en el país.

El artículo se organiza en cuatro secciones. En la primera se señala la importancia, mediante una reseña de algunos estudios científicos, de los riesgos de las nanopartículas y los nanomateriales hacia los trabajadores, consumidores y el medio ambiente. En la segunda se resumen los principales aspectos del desarrollo de las nanociencias y nanotecnologías en México a partir de indicadores generales. En la tercera sección se explica la metodología de investigación implementada para determinar la importancia que se adjudica al tema riesgos en la investigación de nanotecnología en México. La cuarta parte siste-

matiza los resultados obtenidos. El artículo finaliza con breves conclusiones.

Las Nanotecnologías y los Riesgos para Consumidores, Trabajadores y el Medio Ambiente

Existe evidencia que permite sustentar la aplicación de un criterio de precaución en la creación de productos que contienen nanopartículas, nanomateriales o elementos nanotecnológicos.³ De acuerdo a Kulinowski (2009) del Departamento de Química de la Universidad de Rice, Estados Unidos, hay tres aspectos a considerar al respecto. En primer lugar están las características nuevas a la escala nanométrica (entre 1 y 100 nanómetros) que la materia desarrolla; es decir, propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes de las que normalmente presentan los mismos materiales en tamaño mayor. El tamaño permite a los nanomateriales traspasar barreras biológicas y mantener una gran movilidad dentro del cuerpo humano; de manera que la interacción de nanomateriales con los organismos vivos puede tener resultados imprevistos. En segundo lugar, la mayoría de los nanomateriales y nanoestructuras ingresan al mercado sin previo análisis de toxicidad, y las pruebas disponibles actualmente no son adecuadas para una evaluación completa de sus riesgos potenciales. En tercer lugar, varios estudios in vitro o llevados a cabo en animales mostraron que ciertos nanomateriales son tóxicos y, muy probablemente, también podrán serlo para los seres humanos. Hay, sin embargo, docenas de estudios que incrementan la preocupación acerca de las nanopartículas y nanomateriales. Aquí se reseñan sólo algunos.

Los consumidores pueden quedar expuestos a los nanomateriales a través de la ingestión, inhalación o contacto directo. Esto puede ocurrir por el uso o consumo de productos con nanomateriales, por su liberación en el aire o el medio ambiente o como resultado de la descomposición de basura, accidentes, o la quema de nano-productos; en consecuencia, los nanomateriales y nanopartículas podrían ser reabsor-

¹ Utilizaremos el término “nanotecnologías” para referirnos tanto a las nanociencias como a las nanotecnologías.

² En 2012 la Secretaría de Economía elaboró una guía para la reglamentación de las nanotecnologías, pero se trata de una propuesta no vinculante (Grupo de trabajo sobre regulaciones para la nanotecnología, 2012)

³ De acuerdo a la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) y el Comité Técnico responsable (TC), una nano-partícula es un objeto con sus tres dimensiones en la nano-escala (1-100 nanómetros); un nano-material es aquél con al menos una de sus dimensiones en la nano-escala y un nano objeto puede tener una, dos o tres dimensiones en la nano-escala (ISO/TC 229, 2010).

bidos por los alimentos u otras cadenas productivas (Kohler, Som, Helland, and Gottschalk, 2008).

En varios estudios preliminares los nanotubos de carbono mostraron patrones tóxicos similares al asbesto, causando alergias y desarrollando propiedades cancerígenas (Poland, Duffin, Kinloch, Mayonard, Wallace, Seaton and Donaldson, 2008; Takagi, Hirose, Nishimura, Fukumori, Ogata, Ohashi, Kitajima and Kanno, 2008; Chou, Hsiao, Hong, Chen, Peng, Chen, and Yang, 2008; Ghafari, St-Denis, Power, Jin, Tsou, Mandal, Bols and Tang, 2008; Nygaard, Jitka, Mari, Torunn, Calin and Løvik, 2009). Otros nanomateriales, por ejemplo, que ya están siendo usados en la industria del procesamiento y envasado de alimentos, pueden tener impactos no deseados en la salud y el medio ambiente. Algunos informes han llegado a la conclusión de que las partículas de nano-plata, utilizadas como bactericidas, pueden dañar las cadenas de ADN, interferir con su replicación, e incluso unirse a las mismas (Yang, Shen, Ji, An, Wang, Liu, and Zhang, 2009). Los mismos nanomateriales manufacturados (nano-plata) pueden dañar las células epiteliales (Stoehr, González, Stampfl3, Casals, Duschl, Puentes and Oostingh, 2011) y también tener efectos ambientales destructivos (Liu, Wang, Liu, Kane, & Hurt, 2012). La Agencia Química Sueca, en respuesta a una solicitud de la Agencia de Agua Potable de Estocolmo, demostró que las nanopartículas en textiles son liberadas después de algunos ciclos de lavado y luego de entrar en contacto con ciertos tipos de jabón (Sweden Chemical Agency, 2012).

Algunos otros estudios muestran cómo los nanomateriales de plata y sílice, empleados en el envasado de alimentos, migran hacia los alimentos mismos (Avela, Vlieger, Errico, Fischer, Vacca & Grazia, 2005; Dekkers, 2010; Huang, Chen, Bing, Gao, Wang & Yuan, 2011). Vale la pena mencionar que un exceso de plata en el cuerpo humano provoca argirosis (una patología en el tejido que lo tiñe de un color azulado, y que es resultado de la deposición de un albuminato insoluble de plata), y existen estudios que muestran efectos similares de este material en su escala nano (Liu, Wang, Liu, Kane & Hurt, 2012). En el sector de la alimentación hay otros nanomateriales que ya se están utilizando, como el dióxido de titanio. Por su parte Zhu, Wang, Zhang, Chang y Chen (2010) muestran cómo las nanopartículas de dióxido de titanio se movilizan dentro de la cadena alimentaria.

Existe muy poca investigación sobre el impacto de los residuos que contienen nanomateriales. El tema de la ingestión de residuos en los laboratorios, especialmente los nanomateriales, es un área gris, y sigue siendo incierto si los laboratorios consideran estos materiales como tóxicos. Además, no existe suficiente información para concluir si los protocolos de manejo de residuos en hospitales y laboratorios son lo suficientemente robustos para degradar los nanomateriales de forma segura.

Aparte de los estudios científicos antes mencionados hay casos de trabajadores afectados por nanomateriales. Los trabajadores son el grupo social más expuesto a los riesgos. A finales de 2013 se publicó un artículo basado en un estudio comparativo de 14 fábricas en Taiwán. El estudio estuvo avalado por los Institutos Nacionales de Investigación de Salud de Taiwán e implicó colocar biomarcadores en 124 trabajadores que manipularon nanomateriales diversos en el transcurso de seis meses, y otro tanto en 77 trabajadores que no tuvieron contacto con tales materiales.⁴ El estudio arrojó que los trabajadores que manipularon nanomateriales tuvieron valores comparativos de menor eficiencia en las tres áreas biológicas estudiadas (pulmones, efectos cardiovasculares y enzimas antioxidantes), frente a aquellos que no tuvieron contacto. Esto no quiere decir que la manipulación de estos materiales derivara en daño hasta el punto de causar enfermedad; más bien, este caso mostró que la transferencia inadvertida de los nanomateriales muy probablemente tuvo algún efecto en el organismo humano (Liao, Chung, Lai, Wang, Chiang, Li, Tsou, Li, Lee, Wu, Lin, Hsu, Ho, Chen, Shih, Lin, and Liou, 2013). El desafortunado evento que involucró a siete trabajadoras chinas, en una fábrica de pinturas, y que trabajaron con nanotecnología, es otro caso que no debe ser ignorado. Después de un período de entre 5 y 13 meses de trabajo fueron hospitalizadas con problemas respiratorios, dos de ellas murieron y los otras cinco quedaron con lesiones permanentes (Song, Li and Du, 2009). Investigadores mostraron en un estudio una creciente descomposición en las enzimas antioxidantes y un incremento en los biomarcadores de monitoreo cardiovascular en trabajadores que tuvieron contacto con nanomateriales (Liou, Tsou, Wang, Li, Chiang, Li, Lin, Lai, Lee, Lin, Hsu, Chen, Shih, Liao, and Chung, 2012). Los

⁴ En el estudio participaron 13 empresas y los nanomateriales manipulados fueron de distintos tipos: nanoplata, dióxido de titanio, óxido de silicio, nanotubos de carbono, nano-oro y óxido de hierro. Los nanomateriales manipulados se presentaron en forma de polvo, solución líquida y gel (Liao et al., 2013).

ejemplos anteriores proporcionan una fuerte evidencia en apoyo al llamado de los sindicatos para la aplicación de medidas precautorias.

El desarrollo de las nanotecnologías en México

En el contexto latinoamericano México ocupa el segundo lugar, después de Brasil, en el desarrollo de las nanotecnologías (Foladori e Invernizzi, 2013). No obstante, aunque en México el desarrollo de las nanotecnologías es incipiente y orientado a la investigación básica, se identificaron más de 100 empresas que ofrecen productos que contienen nanotecnologías a la venta, ya sea que fueran manufacturados internamente o importados (Záyago Lau, Foladori y Arteaga, 2012). Más recientemente, el INEGI realizó una proyección de datos derivada de una encuesta donde muestra que las empresas que hacen uso de nanotecnología (investigación y/o producción) pueden alcanzar las 188 (INEGI y CONACYT, 2013). Además, 60 o más universidades y otros centros de investigación tienen proyectos en nanotecnología, al tiempo que existen varias colaboraciones y acuerdos de investigación internacionales sobre el tema (Robles-Belmont, 2012; Záyago Lau y Foladori, 2010; Záyago Lau, 2014).

México lleva dos décadas de experiencia en investigación de nanotecnologías. El gobierno las ha considerado como estratégicas y ha apoyado financieramente la creación de laboratorios nacionales, una red nacional de investigadores en la materia y el establecimiento de algunos clústeres de investigación y desarrollo (Záyago Lau y Foladori, 2010). Sin embargo, no ha constituido un organismo nacional que determine objetivos, establezca normas y oriente el desarrollo de estas tecnologías.

En el contexto internacional, y como consecuencia de los riesgos a la salud y/o el medio ambiente, varios países han comenzado a tomar medidas regulatorias (Kulinowski, 2009).⁵

En México se han dado muy recientemente algunos pasos hacia la regulación de los nanomateriales. A finales de 2012 una comisión coordinada por el Centro Nacional de Metrología (CENAM), sub-oficina de la Secretaría de Economía, dio a conocer un documento con lineamientos generales para regular las nanotecnologías (Grupo de trabajo sobre regulaciones para la nanotecnología, 2012); sin embargo, estas directrices

tienen por objeto homogeneizar normas comerciales, y poco tienen que ver con la evaluación y la regulación de los riesgos a la salud humana o el medio ambiente de los nanomateriales (Foladori y Záyago Lau, 2014). En este marco, surge el interés por indagar la relevancia que se le otorga a este tema en la investigación científica mexicana.

Metodología

Se utilizaron dos técnicas para la recopilación de datos referentes a la importancia que investigadores mexicanos asignan a las cuestiones de riesgos para la salud o el medio ambiente de los nanomateriales.

La primera técnica utilizó la base de datos de la Web of Science (WoS) que contiene todos los artículos sobre nanotecnologías publicados por autores mexicanos para el período 2000 – 2012, mediante el seguimiento de términos señalados por Kostoff, Murday, Lau, y Tolles (2006) (Záyago Lau, Frederick & Foladori, 2014). Se identificaron 4 471 artículos publicados con al menos un autor afiliado a una institución mexicana, entre las que sobresalen aquellas que concentran el 63% del total de artículos: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (1706), los Centros de Investigación CONACYT (1132), el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y del Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) (1061), y todos los campus de la Universidad Autónoma Metropolitana (409) (Záyago Lau, Frederick & Foladori, 2014). Posteriormente, se identificaron términos asociados con la toxicidad y análisis de riesgo de los nanomateriales en la literatura clave sobre el tema. Los términos fueron *tóxico*, *disfunción*, *deterioro*, *estrés oxidativo*, *inflamación*, *exposición*, *riesgo*, *dañino*, *peligro*, *absorción oral*, *ingestión*, *penetración cutánea*, *inhalación*, *transdérmica / transdérmico*. Inmediatamente se ejecutó una revisión manual que identificó a los artículos relevantes, descartando aquellos que no tenían una relación directa con el tema. Finalmente, se realizó una búsqueda para los términos *tóxico*, *disfunción*, *deterioro* y *estrés oxidativo*; los cuales permitieron encontrar a los artículos relacionados específicamente con los riesgos de los nanomateriales para la salud y el medio ambiente.

⁵ Véase algunos ejemplos en el Website UnderstandingNano.com (<http://www.understandingnano.com/nanotechnology-regulation.html>).

La segunda técnica se centró en ubicar a grupos de investigación, laboratorios o científicos que realizan investigación sobre los riesgos de los nanomateriales. Para este fin se utilizó la base de datos de Cuerpos Académicos (CAs) de la Secretaría de Educación Pública (SEP), que es parte del Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP). El PROMEP fue creado para mejorar la competencia en investigación y las capacidades científicas del personal académico laborando en las universidades públicas, universidades politécnicas e institutos tecnológicos.⁶ Se utilizó el motor de búsqueda del programa de CAs (<http://promep.sep.gob.mx/ca1/>) con la palabra clave nano *. De los 4,087 CAs registrados en marzo de 2013 se detectaron 99 con líneas de investigación vinculadas a las nanotecnologías. Después se realizó una búsqueda dentro de esos 99 CAs a fin de determinar cuáles estaban evaluando los riesgos de los nanomateriales. Se utilizaron los términos clave descritos anteriormente. A la información de los CAs se le agregó la revisión manual de los centros de investigación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) e instituciones privadas que tienen actividades de investigación en nano, pero que no son parte del programa de CAs de la SEP. Se ingresaron las mismas palabras clave en el motor de búsqueda de cada una de sus páginas web.

La investigación sobre la toxicidad de los nanomateriales en México

De los 4 471 artículos sobre nanotecnologías en México sólo 27 se enfocan a la toxicidad de los nanomateriales para la salud humana o el medio ambiente. Esto representa el 0.6% del total para un período de 12 años. A modo de comparación, los artículos sobre nanomedicina fueron 182, que representan el 4.1% del total (investigación en curso).

La distribución de los artículos sobre la toxicidad de los nanomateriales, por institución, se muestra en la siguiente tabla.

La búsqueda individual dentro de las principales instituciones de investigación entregó resultados simi-

⁶ El PROMEP apoya la formación de grupos de investigación, o CAs. Cada CA se organiza en torno a un interés de investigación común, con el objetivo de generar nuevo conocimiento en el área. Cada CA debe tener al menos tres miembros, y el programa asigna recursos para llevar a cabo planes de investigación, publicar resultados, o fomentar la movilidad académica (PROMEP, 2013).

Tabla 1. Artículos sobre riesgos de los nanomateriales con al menos un autor afiliado a una institución Mexicana y publicado en la WoS entre 2000 y 2012 y agrupados por institución ⁷

Fuente: Investigación propia a partir de la Web of Science

Institución	Total	%
Total en nanotecnología	4471	100
Toxicidad de los nanomateriales manufacturados	27	0.6
Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)	5	-
Universidad de Guanajuato (UGTO)	4	-
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)	3	-
Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-I, UAM-C, UAM-A)		
Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV)	2	-
Centro de Investigación en Estudios Avanzados (CINVESTAV)		
Instituto Nacional de Cardiología - Ignacio Chávez (INC-IC)		
Instituto Potosino de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (IPICYT)		
Universidad de Sonora (US)	2	-
Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)		

lares. De los 99 CAs de la base de datos del PROMEP que realizan investigación con nanotecnologías, sólo uno, ubicado en la Universidad de Guadalajara y con registro UDG-CA-682, realiza investigación sobre toxicidad de los nanomateriales (citotoxicidad) (PROMEP, 2014). Dos de los Centros CONACYT, no incluidos en la base de datos del PROMEP, están realizando investigaciones sobre la toxicidad de los nanomateriales. Uno de ellos es el IPICYT y el otro es el CIMAV que, en 2011, en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología (INECOL), planeó la creación de un laboratorio para analizar los efectos de los nanomateriales en el medio ambiente, así como su biocompatibilidad (CIMAV, 2011). Sin embargo, el laboratorio no ha entrado en funcionamiento todavía. Otros centros de investigación que tienen líneas de investigación sobre riesgos de nanomateriales son la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el CIQATA-Querétaro, el Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), y otros centros de investigación públicos y universidades privadas. No obstante, el número

⁷ En el caso de coautorías el primer autor mexicano fue seleccionado, así como su adscripción institucional.

total de centros de investigación que tienen proyectos sobre los riesgos potenciales de los nanomateriales para la salud o el medio ambiente no es mayor a 10. Los resultados se resumen en la tabla 2.

Además de estas instituciones, que tienen o tuvieron proyectos sobre riesgos de los nanomateriales, el CENAM propuso, en 2007, implementar una línea de investigación para cuantificar los nanomateriales en México con riesgo potencial alto para la salud humana (Lazos-Martínez, 2007). Al momento de esta publicación, sin embargo, no logramos ubicar más información al respecto.

Los resultados ilustran que las instituciones haciendo investigación sobre los riesgos de nanomateriales se encuentran muy dispersas. Este escenario deja a México en una posición de debilidad frente a la rápida introducción de nuevos productos en el mercado que contienen nanomateriales. No existe ninguna base de datos oficial de nano-productos en el mercado mexicano. Sin embargo, hay desarrollos que pueden indicar algunas tendencias. Por ejemplo,

el número de los nano-productos en el inventario del *Woodrow Wilson International Center for Scholars* llega a más de 1 600 (WWICS, 2014), pero esta base de datos no registra a las nanomaterias primas que podrían incrementar esta cifra exponencialmente. México es el país con más tratados de libre comercio firmados en el mundo y, como miembro del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), es muy probable que los productos nanotecnológicos estén entrando al país. Debe considerarse, además, la comercialización de otros productos intermedios, como los nanotubos de carbono de una pared (SWCNT), que en sus variantes alcanzan miles de toneladas anuales a nivel mundial (Organización Mundial de la Salud, 2013). La cantidad de nanomateriales que se intercambian actualmente en los circuitos comerciales internacionales plantea dudas sobre lo que pudiera estar llegando a México hoy en día. De hecho, muchos de los nanomateriales utilizados en laboratorios mexicanos se importan de los Estados

Tabla 2. Instituciones con investigación en riesgos de los nanomateriales y según sus páginas Web institucionales (búsqueda durante febrero de 2014).

Fuente: revisión de los autores de las páginas Web institucionales

Institución	Tema	Referencia
Universidad de Guadalajara (UdeG)	Citotoxicidad de los nanomateriales (UDG-CA-682)	(PROMEP, n.d.)
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT)	Toxicidad y biocompatibilidad de los nanomateriales	(IPICYT, 2013)
Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) - Instituto Nacional de Ecología (INECOL)	Laboratorio sobre los efectos de las nanopartículas en el ambiente, biocompatibilidad (en formación)	(CIMAV, 2011)
Instituto de Investigación en Materiales (UNAM -IIM)	Toxicidad de los nanomateriales y sus efectos en aplicaciones médicas, cosméticas y dispositivos electrónicos	(El Universal, 2013)
Centro de Investigación en Materiales Avanzados del IPN (CINVESTAV)	Impacto de los nanomateriales y su potencial toxicidad	(CINVESTAV, n.d.)
Centro de Investigaciones en Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada (CICATA-Qro)	Síntesis de polímeros transportadores de nanopartículas de plata. Evaluación de su efecto tóxico en culturas de neoplasma celular	(Casañas-Pimentel, San-Martín, Martínez, & Pérez, 2008)
Universidad Autónoma de Nuevo León	Centro de Investigación en Biotecnología y Nanotoxicología	(UANL, 2012)
Instituto Tecnológico de Altos Estudios de Monterrey (ITESM)	Riesgos de los nanomateriales para la salud humana y ambiental	(Salazar, 2013)
Universidad de las Américas en Puebla (UDLAP)	Nanotoxicología en alimentos medicina	(UDLAP, 2014)
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP)	Biocompatibilidad de nanomateriales y su toxicidad en aplicaciones médicas	(UPAEP, n.d.)

Unidos, y algunos otros, como la nano-plata, se fabrican localmente. Sigma Aldrich, por ejemplo, una empresa transnacional de alta tecnología, es uno de los proveedores de nanomateriales a muchos centros de investigación y laboratorios mexicanos (Sigma-Aldrich, 2014).

Otro aspecto a tomar en cuenta es la nano-contaminación en las ciudades donde se establecen los parques especializados en I+D nanotecnológica. La ciudad de Monterrey puede ser el ejemplo más importante. El clúster de nanotecnología de Nuevo León se encuentra en esta ciudad, y este parque es el proyecto emblemático del desarrollo de la nanotecnología del gobierno mexicano (Záyago Lau, 2011). La mayoría de las poco más de 50 empresas localizadas en este parque manufacturan y manipulan nanomateriales para satisfacer la demanda del sector químico (Záyago Lau, 2011), pero se requiere de mayor investigación para tener una distribución sectorial más completa y mayor certeza sobre la posible nano-contaminación.

Otro factor de preocupación, respecto a la gestión de los riesgos de los nanomateriales, es la falta de regulación en México. La cuestión del riesgo está en el centro de la política regulatoria de los nano-productos en todo el mundo. Europa ha puesto en marcha marcos de regulación para cosméticos, alimentos y biocidas basada en la medida precautoria del principio “sin datos no hay mercado”. Los Estados Unidos tienen un enfoque diferente, basado en “los riesgos conocidos”; esto implica que no debe implementarse ninguna regulación antes de que cualquier riesgo se haya demostrado científicamente. Otro principio de la política de riesgo de los Estados Unidos es la “presunción del principio de seguridad”, que supone que un producto es seguro a menos que se demuestren los riesgos. Bajo este marco los Estados Unidos sólo requieren de una simple notificación por parte del productor antes de negociar cosméticos, alimentos y biocidas con nanomateriales. En este contexto los Estados Unidos están negociando con sus socios comerciales una plataforma para homogeneizar la regulación de varios productos comerciales, incluyendo los productos nanotecnológicos. De hecho, los Estados Unidos han influido al gobierno mexicano a adoptar un marco regulatorio para nano-productos similar a los de ese país (Foladori y Záyago Lau, 2014).

Ante la preocupación y el número de estudios que ilustran los potenciales riesgos de los nanomateriales a la salud humana, diversas agencias gubernamentales han empezado a dar seguimiento al tema y a financiar estudios sobre la toxicidad de los nanomateriales. El programa *Epinano* del Instituto Nacional de Vigilancia Sanitaria de Francia (INVS) tiene el objetivo de supervisar el estado de salud de trabajadores que producen o manipulan nanomateriales (INVS, 2014). A principios de este año, la Comisión para la Seguridad de Productos al Consumidor (CPSC) de Estados Unidos aseguró 7 millones de dólares por parte de la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF) (institución equivalente al CONACYT en ese país), con el objetivo de estudiar los riesgos de los nanomateriales a la salud humana (Kern, 2015). Por su parte en Australia se creó *Safe Work Australia*, un cuerpo tripartita formado por el gobierno, representantes de trabajadores y empresarios para promover la seguridad en los lugares de trabajo. Este organismo ha creado manuales de procedimiento para disminuir riesgos y evaluar los impactos a la salud de los trabajadores que manipulen distintos nanomateriales (se incluye una lista de 12) (Safeworkaustralia, 2014). México, no obstante, carece de este tipo de mecanismos y tampoco existen programas específicos en instituciones académicas y centros de investigación del país, por lo que es necesario apoyar y fomentar este tipo de iniciativas.

Conclusiones

El tema de los riesgos para la salud y el medio ambiente de los nanomateriales manufacturados ha estado ausente de la gran mayoría de los esfuerzos de investigación en México, como lo demuestra el análisis bibliométrico. Sólo 27 artículos científicos tratan este tema, de los más de 4 000 sobre nanotecnologías publicados en los últimos 12 años. Esto representa sólo el 0,6% del total. Además, la búsqueda manual por cada centro de investigación no arrojó muchos resultados. Hay muy pocos proyectos dirigidos por personas interesadas en este tema. Tampoco hay instituciones que hagan de este tema un objetivo y compromiso a largo plazo para sus grupos de investigación. Incide en ello, posiblemente, que el CONACYT, a cargo del financiamiento de la mayor parte de la investigación científica en el país, no tenga una política que obligue a evaluar los riesgos potenciales para la

salud y el medio ambiente de los nanomateriales, más allá de los protocolos de evaluación *estándar* cuando se trata de seres vivos. Tampoco la Red Nacional de Nanociencia y Nanotecnología, que abarca un gran número de investigadores en las nanotecnologías, tiene alguna postura al respecto. Sin un marco regulatorio para la investigación de los riesgos, el tema queda absolutamente fuera de la agenda de investigación en México **f**

Agradecimientos

Este material está basado, en parte, en el trabajo apoyado por la National Science Foundation bajo el Acuerdo de Cooperación No. 0.938.099. Las opiniones, resultados y conclusiones o recomendaciones expresadas en este material son las de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista de la National Science Foundation.

Bibliografía

- Avella, M.; Vlioger, J.; Errico, M. E.; Fischer, S.; Vacca, P. and Grazia, M. (2005). "Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications". *Food Chem.*, 93(3), 467–474.
- Casañas-Pimentel, R.; San-Martín, E.; Martínez, G. and Pérez, I. (2008). "Synthesis of nano-carriers of silver nanoparticles: Toxicity research in cellular lines of neo-plastic origin". *Int. Symp. on Advance Technology, Cicata-Querétaro*.
- Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADETUNAM). (2011). "Informe de Actividades 2011". (http://www.ccadet.unam.mx/informe2011/PDFS/PDFS_red/Presentacion.pdf). Accesado: jun. 12, 2014.
- Centro de Ciencias Genómicas-Universidad Nacional Autónoma de México (CCG-UNAM). (2014). (<http://www.ccg.unam.mx/es/search/node/ecotoxicidad>). Accesado: jun. 21, 2014.
- Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados (CIMAV). (2011). "Executive summary of activities and relevant results". (www.cimav.edu.mx/acciones-result-relevantes-2011.docx). Accesado: ene. 24, 2014.
- Chou, C.; Hsiao, H.; Hong, Q.; Chen, C.; Peng, Y.; Chen, H. and Yang, P. (2008). "Single-walled carbon nanotubes can induce pulmonary injury in mouse model". *NanoLett.*, 8(2), 437–445.
- Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados (CINVESTAV). (2012). "Toxicology Department Research Areas". (<http://www.toxicologia.cinvestav.mx/L%EDneasdInvestigaci%F3n.aspx>). Accesado: jun. 2, 2014.
- Dekkers, S. (2010). "Presence and risks of nanosilica in food products". *Nanotoxicology*, 5(3), 1–13.
- El Universal. (2013). "Estudian si el bismuto es seguro para los seres vivos". (<http://www.eluniversal.com.mx/articulos/76240.html>). Accesado: mar. 4, 2014.
- INVS. (2014). "Epinano - Dispositif de Surveillance Épidémiologique des Travailleurs Potentiellement Exposés aux Nanomatériaux". (<http://www.invs.sante.fr/Dossiers-thematiques/Travail-et-sante/Epinano-Dispositif-de-surveillance-epidemiologique-des-travailleurs-potentiellement-exposes-aux-nanomateriaux>). Accesado: feb. 10, 2015.
- Foladori, G. and Invernizzi, N. (2013). "Inequality gaps in nanotechnology development in Latin America". *J. Arts Humanities*, 2(3), 36–45.
- Foladori, G. and Záyago Lau, E. (2014). "The regulation of nanotechnologies in Mexico". *Nanotechnol. Law Bus. J.*, 11(2), 164–171.
- Ghafari, P.; St-Denis, C.; Power, M.; Jin, X.; Tsou, V.; Mandal, H.; Bols, N. and Tang, X. (2008). "Impact of carbon nanotubes on the ingestion and digestion of bacteria by ciliated protozoa". *Nat. Nanotechnol.*, 3(6), 347–351.
- Grupo de trabajo sobre regulaciones para la nanotecnología. (2012). "Lineamientos para regulaciones sobre nanotecnologías para impulsar la competitividad y proteger al medio ambiente, la salud y la seguridad de los consumidores". Secretaría de Economía, (http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/normalizacion/dgn/2012_11_27_Lineamientos_regulaciones_nanotecnologia.pdf). Accesado: mayo 12, 2014.
- Huang, Y.; Chen, S.; Bing, X.; Gao, C.; Wang, T. and Yuan, B. (2011). "Nanosilver migrated into food-simulating solutions from commercially available food fresh containers". *Packag. Technol. Sci.*, 24(5), 291–297.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI), and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). (2013). "Presentan CONACYT e INEGI los principales resultados de la encuesta sobre investigación y desarrollo tecnológico y módulo sobre actividades de biotecnología y nanotecnología (ESIDET MBN) 2012 (Boletín de Prensa No. 485 /13)". Aguascalientes, Ags. México: INEGI / CONACYT, (<http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Boletines/Boletin/Comunicados/Especiales/2013/noviembre/comunica35.pdf>). Accesado: mayo 5, 2014.
- Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología (IPI-CyT). (2013). "Publicaciones e investigaciones de 2013". Instituto Potosino de Investigación Científica, (http://www.ipicyt.edu.mx/Ciencias_Ambientales/areas_ciencias_ambientales_publicaciones.php?publicacion=1&anio=2013). Accesado: jun. 12, 2014.
- International Organization for Standardization / Technical Committee (ISO/TC). (2010). "Vocabulary – Core terms, Nanotechnologies", (http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=51240). Accesado: feb. 13, 2015.
- Kay, L. and Shapira, P. (2009). "Developing nanotechnology in Latin America". *J. Nanopart. Res.*, 11(2), 259–278.
- Kern, R. (2015). "Proposal for CPSC Nanotechnology Center Would Study Consumer Health Risks". *Product Safety and Liability Reporter*, 43(8), 1-3.
- Kohler, A.; Som, C.; Helland, A. and Gottschalk, F. (2008). "Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle". *J. Cleaner Prod.*, 16(8–9), 927–937.
- Kostoff, R. N.; Murday, J. S.; Lau, C. G. Y. and Tolles, W. M. (2006). "The seminal literature of nanotechnology research". *J. Nanopart. Res.*, 8(2), 193–213.
- Kulinowski, K. (2009). "Temptation, temptation, temptation: Why easy answers about nanomaterial risk are probably wrong". *AzoNanotechnology*, (<http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2448>). Accesado: jun. 2, 2014.
- Lazos-Martínez, R. (2014). "Standards for nanotechnology in Mexico". CENAM, Centro Nacional de Metrología, (<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/obj/inms-ienm/doc/mexico-nanotechnology.pdf>). Accesado: ene. 16, 2014.
- Liao, H.-Y.; Chung, Y.; Lai, C.; Wang, S.; Chiang, H.; Li, L.; Tsou, T.; Li, W.; Lee, H.; Wu, W.; Lin, M.; Hsu, J.; Ho, J.; Chen, C.; Shih, T.; Lin, C. and Liou, S. (2013). "Six-month follow-up study of health markers of nanomaterials among workers handling engineered nanomaterials". *Nanotoxicology*, 8(1), 1–11.
- Liou, S.; Tsou, T.; Wang, S.; Li, L.; Chiang, H.; Li, W.; Lin, P.; Lai, C.; Lee, H.; Lin, M.; Hsu, J.; Chen, C.; Shih, T.; Liao, H. and Chung, Y. (2012). "Epidemiological study of health hazards among workers handling engineered nanomaterials". *J. Nanopart. Res.*, 14(878), 1–15.
- Liu, J.; Wang, Z.; Liu, F. D.; Kane, A. B. and Hurt, R. H. (2012). "Chemical transformations of nanosilver in biological environments". *ACS Nano.*, 6(11), 2–16.
- Nygaard, U.; Jitka, H.; Mari, S.; Torunn, A.; Calin, D. M. and Løvik, M. (2009). "Single-walled and multi-walled carbon nanotubes promote allergic immune responses in mice". *Toxicol. Sci.*, 109(1), 113–123.
- Observatorio Iberoamericano de Ciencia, Tecnología e Innovación (OICTel). (2008). "La nanotecnología en Iberoamérica. Situación actual y tendencias". Centro de Altos Estudios Universitarios de la OEI, (<http://www.oei.es/salactsi/nano.pdf>). Accesado: Mar. 5, 2013.
- Poland, C. A.; Duffin, R.; Kinloch, I.; Maynard, A.; Wallace, W. A.; Seaton, A. and Donaldson, K. (2008). "Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study". *Nat. Nanotechnol.*, 3(7), 423–428.
- Programa de Mejoramiento al Profesorado (PRO-MEP). (2013). "Descripción de los Cuerpos Académicos. Cuerpos Académicos". Promep/SEP, (http://promep.sep.gob.mx/desc_apoyos_ca.html). Accesado: feb. 22, 2014.
- Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP). (2014). "Cuerpos Académicos Reconocidos".

- (<http://promep.sep.gob.mx/cuerpos.html>).
Accesado: feb. 22, 2014.
- Robles-Belmont, E. (2012). "Progresión de las nanociencias en México: una perspectiva a partir de redes". *Perspectivas sobre el desarrollo de las nanotecnologías en América Latina*, G. Foladori, E. Záyago, and N. Invernizzi, eds., México, DF, 30–38 (in Spanish).
- Safe Work Australia. (2014). "Work health and safety assessment tool for handling engineered nanomaterials". (http://www.safeworkaustralia.gov.au/sites/SWA/about/Publications/Documents/547/Work_health_safety_assessment_tool_handling_engineered_nanomaterials.doc). Accesado: feb. 22, 2015.
- Salazar, G. (2013). "Talento Tec. Mecanismos y métodos de nanotoxicología. Instituto Tecnológico Superior de Monterrey". (<http://micampus.ccm.itesm.mx/web/talento-tec/inicio/-/blogs/el-dr-rodrigo-balam-escribe-en-revista-internacional-sobre-nanotoxicologia>). Accesado: feb. 22, 2014.
- Sigma-Aldrich. (2014). "Nanotechnology market". (<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/nanotechnology.html>). Accesado: jun. 23, 2014.
- Song, Y.; Li, X. and Du, X. (2009). "Exposure to nanoparticles is related to pleural effusion, pulmonary fibrosis and granuloma". *Eur. Respir. J.*, 34(3), 559–567.
- Stoehr, L.; González, E.; Stampfl, A.; Casals, E.; Duschl, A.; Puentes, V. and Oostingh, G. (2011). "Shape matters: Effects of silver nanospheres and wires on human alveolar epithelial cells". *Part. Fibre Toxicol.*, 8(36), 1–15.
- Swedish Chemical Agency. (2012). "Antibacterial substances leaking out with the washing water - analyses of silver, triclosan and triclocarban in textiles before and after washing. Swedish Chemicals Agency". (http://www.kemi.se/Documents/Publikationer/Trycksaker/PM/PM1_12_Antibact_eng.pdf). Accesado: mar. 2, 2014.
- Takagi, A.; Hirose A.; Nishimura, T.; Fukumori, N.; Ogata, A.; Ohashi, N.; Kitajima, S. and Kanono, J. (2008). "Induction of mesothelioma in p53^{-/-} mouse by intraperitoneal application of multi-wall carbon nanotube". *J. Toxicol. Sci.*, 33(1), 105–116.
- Understandingnano.com. (<http://www.understandingnano.com/nanotechnology-regulation.html>). Accesado: mayo 12, 2014.
- Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). (2012). "Centro de investigación en biotecnología y nanotoxicología". Universidad Autónoma de Nuevo León, (<http://www.uanlmexico.com.mx/noticias/institucional/centro-de-investigacion-en-biotecnologia-y-nanotoxicologia.html>). Accesado: feb. 3, 2014.
- Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). (2014). "Aracely Angulo Molina. Universidad de las Américas Puebla". (<http://www.udlap.mx/ofertaacademica/profesores.aspx?cveCarrera=LCF&profesor=0016106&extracto=2>). Accesado: feb. 22, 2014.
- Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP). (2014). "Investigación del Departamento de Ciencias Biológicas". (http://www.upaep.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=1544&Itemid=952). Accesado: feb. 22, 2014.
- Woodrow Wilson International Center for Scholars (WWICS). (2014). "Consumer products directory". (<http://www.nanotechproject.org/cpi/>). Accesado: may 4, 2014.
- World Health Organization. (2013). "Nanotechnology and human health: Scientific evidence and risk governance". (http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0018/233154/e96927.pdf). Accesado: mar. 8, 2014.
- Yang, W.; Shen, C.; Ji, Q.; An, H.; Wang, J.; Liu, Q. and Zhang, Z. (2009). "Food storage material silver nanoparticles interfere with DNA replication fidelity and bind with DNA". *Nanotechnology*, 20(8), 1–17.
- Záyago Lau, E. (2011). "Nanotech cluster in Nuevo León, México: Reflections on its social significance". *Nanotechnol. Law Bus. J.*, 8(1), 49–59.
- Záyago Lau, E. y Foladori, G. (2010). "La nanotecnología en México: un desarrollo incierto". *Economía Sociedad y Territorio*, X(32), 143–178.

- Záyago Lau, E., Foladori, G., and Arteaga, E. (2012). "Toward an inventory of nanotechnology companies in Mexico". *Nanotechnol. Law Bus. J.*, 9(3), 283–292.
- Záyago Lau, E.; Frederick, S. and Foladori, G. (2014). "Twelve years of nanoscience and nanotechnology publications in Mexico". *J. Nanopart. Res.*, 16(2193), 1–10.
- Zhu, X., Wang, J., Zhang, X., Chang, Y. and Chen, Y. (2010). "Trophic transfer of TiO₂ nanoparticles from daphnia to zebrafish in a simplified freshwater food chain". *Chemosphere*, 79(9), 928–933.
- Torre, fray Tomás de la. 1944. *Desde Salamanca. España hasta la Ciudad Real Chiapas: diario de viaje 1544-1545*, México, ed. Central.