

El impacto de la nanotecnología sobre la seguridad y la salud laboral.

The impact of nanotechnology on occupational safety and health

Asunción Galera

Fecha de envío: 02 Febrero 2015

Centre Específic de Recerca per a la Millora i Innovació de les Empreses,

Fecha de aceptación: 14 Febrero 2015

Universitat Politècnica de Catalunya | asun.galera@upc.edu

Resumen

El objetivo de este artículo es mostrar la condición de Tecnología Facilitadora Esencial (TFE) de la nanotecnología y su repercusión sobre la responsabilidad legal de garantizar la seguridad y salud de los trabajadores. El artículo se ha estructurado de la siguiente manera: la introducción aborda la dimensión y alcance de la nanotecnología en todos los sectores productivos y su carácter de TEF. El segundo apartado muestra la incertidumbre acerca de la seguridad humana y ambiental de los nanomateriales y su importancia en las políticas de la Unión Europea (UE) y de Estados Unidos en aras de garantizar el desarrollo sostenible de la nanotecnología. El tercer punto introduce el problema sobre la definición de nanomaterial (NM) y presenta los diferentes tipos de nanomateriales y sus aplicaciones en todos los sectores, con especial mención del sector de la construcción. En un cuarto punto se presentan algunos resultados conocidos sobre la toxicidad de los nanomateriales. Finalmente el artículo se cierra con tres reflexiones principales: a) la necesidad de informar a empresarios y responsables de la administración de que el trabajo con nanomateriales supone una modificación de las condiciones de trabajo, por cuanto los nanomateriales (entre 1 y 100 nanómetros) pueden representar un riesgo diferente al del mismo material a un tamaño superior a 100 nanómetros; b) en segundo lugar, el paradigma tradicional de la higiene industrial necesita ser adaptado y modificado para el caso de los nanomateriales. Sin embargo, a día de hoy se puede afirmar que es posible proteger la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a riesgos por exposición a NM, porque instituciones de referencia de todo el mundo han publicado guías de buenas prácticas y han identificado las mejores tecnologías disponibles para la gestión del riesgo “nano”; c) la necesidad de formación para actualizar las competencias de los profesionales de la prevención para garantizar la seguridad de las personas expuestas a nanomateriales en su lugar de trabajo.

Palabras clave

Nanotecnología, Responsabilidad legal, seguridad y salud laboral, nanomateriales, gestión del riesgo

Abstract

The aim of this paper is to show nanotechnology as a Key Enabling Technology (KET) and its impact on the legal responsibility to ensure the occupational health and safety of nanoworkers. The article is structured as follows: the introduction addresses the size and scope of nanotechnology in all productive sectors and its KET condition. The second section shows the uncertainty of human and environmental safety of nanomaterials and their importance in politics of the European Union (EU) and the United States in order to ensure sustainable development of nanotechnology. Third section introduces the problem of the definition of nanomaterial (NM) and presents the different types of nanomaterials and their applications in all sectors, with special mention of the construction industry. In a fourth point some known results on the toxicity of nanomaterials are presented. Finally, the article closes with three main ideas: a) a) the need to inform employers and the Administration that working with nanomaterials implies a modification of working conditions, because NM (between 1 and 100 nanometers) may represent a different risk than the same material at a larger size to 100 nanometers; b) secondly, the traditional paradigm of industrial hygiene needs to be adapted and modified for the case of nanomaterials. However, because of renowned institutions worldwide have published good practices guides and they have identified current best available technologies for risk management related to NM, we can state that it is possible to protect the safety and health of workers exposed to NM; c) the need for training to upgrade the skills of prevention professionals to ensure the safety of people exposed to nanomaterials in the workplace.-

Keywords

Nanotechnology, Legal responsibility, Occupational health and safety, nanomaterials, Risk management

1. Introducción

En la escala nanométrica (1-100 nm) la materia presenta fenómenos únicos. Llegar a conocer y comprender estos fenómenos y disponer de herramientas y métodos para generar materia con unas propiedades específicas, es el propósito conjunto de la ciencia, la ingeniería y la tecnología de la escala nano¹. El avance en paralelo de la nanociencia -la comprensión del comportamiento de la materia en la nanoescala - y de la nanotecnología - con el desarrollo de instrumentos y métodos para la manipulación de la materia en la escala nanométrica - han permitido producir nuevas estructuras, materiales y dispositivos, que básicamente reestructurarán las tecnologías de uso actual para la industria, la medicina, la defensa, la producción de energía, la gestión del medio ambiente, el transporte, la comunicación, la computación y la educación.

La nanotecnología se nos presenta así como una auténtica revolución con un fuerte impacto económico y social. La Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos en su informe sobre las implicaciones sociales de la nanociencia y la nanotecnología (IWGN, 1999) señala que *el impacto de la nanotecnología en el siglo XXI será al menos tan significativo, para la salud, el bienestar y la seguridad, como la suma de la influencia de los antibióticos, los circuitos integrados y los polímeros.*

Las fabulosas expectativas generadas por el potencial de bienestar, innovación y de impacto económico de la nanotecnología se reflejan en la creciente inversión tanto pública como privada en I+D en todos los países, la continua producción científica, la intensa actividad en el campo de la regulación y normativa -actualmente en fase de desarrollo- y el establecimiento de estrategias y políticas nacionales y de alianzas entre los principales agentes implicados, tanto a nivel gubernamental, industrial y de investigación. Tanto es así, que entre 2001 y 2008 el número de descubrimientos, patentes, trabajadores en nanotecnología, programas de financiación de la I+D y de mercados, creció a una tasa media anual del 25%. (Tabla 1).

¹ Debido a que el estudio de la nanociencia y la nanotecnología no ha recibido aún en el ámbito lingüístico español una definición terminológica adecuada, optamos en adelante por adoptar el modelo anglosajón y utilizar el término nano para hacer referencia a cualquier ámbito semántico que incluya una referencia directa a dicho concepto. Así, hablaremos de riesgos nano (nano risk)

Tabla 1 Seis indicadores clave del desarrollo de la Nanotecnología en el mundo y en EEUU (Roco, 2011)

Mundo US	Trabajadores	Artículos científicos	Patentes de aplicaciones	Productos finales	Financiación I+D	Capital riesgo
2000 (real)	~60.000 <i>25.000</i>	18.085 <i>5.342</i>	1.197 <i>405</i>	~\$30.000 M <i>\$13.000 M</i>	~\$1200 M <i>\$307 M</i>	~\$210 M <i>\$170 M</i>
2008 (real)	400.000 <i>150.000</i>	65.000 <i>15.000</i>	12.776 <i>3.729</i>	~\$200.000 M <i>\$80.000 M</i>	~\$ 15.000 M <i>\$</i>	~\$1400 M <i>\$</i>
Crecimiento medio 2000-2008	~25%	~23%	~35%	~25%	~35%	~30%
2015* Estimación 2000	~2.000.000 <i>800.000</i>			~\$1 B <i>\$400.000 M</i>		
2020** Extrapolación	~6.000.000 <i>2.000.000</i>			~\$ 3 B <i>\$ 1 B</i>		

Las cifras a nivel mundial están indicadas en negrita y las correspondientes a EEUU en itálica.

De los 3.1 billones estimados, los productos finales con nanotecnología incorporada representarán la mayor parte, con 2 billones 700.000 millones de dólares, seguido por productos nanointermediarios con 432.000 millones de dólares, mientras que los nanomateriales representarán una suma relativamente pequeña: 3.000 millones en ventas. Las cifras ejemplifican el carácter de Tecnología Facilitadora Esencial (TEF) en el sentido que señala la Comisión Europea: *la importancia macroeconómica de las TFE es que pueden abrir mercados totalmente nuevos o respaldar y mejorar los mercados existentes (...)* Además de alimentar a numerosas cadenas de valor, los productos basados en tecnologías facilitadoras esenciales a menudo sirven como componentes de gran valor añadido que se integran en los productos más complejos. Son estas aplicaciones posteriores las que impulsan un importante crecimiento económico y la competitividad (COM (2009) 512/3). Un ejemplo de ello lo encontramos en los estudios preliminares a la elaboración del decreto de creación de un registro de nanomateriales y nanosustancias contenidos en productos comercializados en el mercado belga. Estos estudios estimaron un rango de entre 35.000 y 40.000 empresas, (entre un 15% y un 20% del total), que ponen en circulación sustancias nano o productos con nanomateriales incorporados. Los 16 sectores identificados en los que había una *alta probabilidad de utilizar nanomateriales* (sic) son: 1. Sector químico, 2. Cosméticos, 3. Farmacéutico, 4. Alimentación, 5. Recubrimientos y tintas, 6. Limpieza y desinfección, 7. Caucho y neumáticos, 8. Plásticos, 9. Materiales de construcción, 10. Textiles, 11. Papeleras, 12. Maderas, 13. Material deportivo, 14. Electrónica, 15. Objetos complejos (automóviles, por ejemplo) y 16. Otros. El mismo estudio estimó, para toda la cadena de suministro, entre 2.000 y 5.000 sustancias nano, entre 80.000 y 160.000 preparaciones nano y entre 800.000 y 1.300.000 artículos distintos que contienen nanomateriales.

La política Europea en materia de Nanotecnología se inició con el “Plan de acción para Europa 2005-2009 en nanociencia y nanotecnología”. Durante el periodo 2007-2011 dentro del séptimo Programa Marco (7PM), se destinaron 2.560 M€ a la

investigación en nanociencia y nanotecnología. De ellos, 896 M€ correspondían a la línea Nanociencias, nanotecnologías, materiales y nuevas tecnologías de producción (NMP). El resto, 1.764 M€, procedía de otras áreas de investigación, como las TIC, la salud, la energía o la biotecnología, donde la nanotecnología tendrá un fuerte impacto, también dedicaron importantes esfuerzos en el desarrollo de su aplicación. El esfuerzo en inversión para afianzar la nanotecnología como motor de innovación no sólo se mantiene, sino que ha aumentado. De especial significación ha sido la designación del programa Grafeno como uno de los dos buques insignia de la investigación europea, con una dotación de 10.000 M€ para los próximos 10 años.

Hay sin embargo un aspecto no resuelto y es el de las consecuencias ambientales y sobre la salud humana asociados a la nanotecnología. La importancia de los aspectos de seguridad y salud humana y ambiental en relación con la nanotecnología, radica en que es el factor limitante del crecimiento del mercado de los productos y servicios con nanotecnología aplicada. Ante el panorama de desarrollo nanotecnológico descrito se deriva que las primeras personas expuestas a potenciales riesgos nano serán las que, de un modo u otro, sintetizan (la síntesis de nanomateriales es una de las principales fuentes de potencial riesgo), manejan o están en contacto con nanomateriales, componentes o productos ya acabados, en sus puestos o lugares de trabajo. En este terreno, el de la seguridad y salud en el trabajo (SST), impera la incertidumbre sobre el impacto potencial para la salud de los trabajadores expuestos a nanosustancias y nanomateriales en las empresas donde se fabrican o utilizan. La organización mundial del trabajo (OIT) ha llamado la atención acerca del enorme desfase entre el conocimiento en las aplicaciones de la nanotecnología y el de su impacto en la salud, brecha que la Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo (EU-OSHA) cuantifica en 20 años, en su informe de 2013 titulado “Prioridades para la investigación sobre seguridad y salud laboral en Europa: 2013-2020”, pag. 11.

2. Políticas

Ya en 2004, la Comisión Europea proponía una estrategia segura, integrada y responsable que abordara lo antes posible los riesgos que, para la salud pública, la seguridad y la salud en el trabajo, el medio ambiente y los consumidores, puedan tener los productos desarrollados mediante la nanotecnología. Sin duda, en el desarrollo nanotecnológico, la seguridad y la puesta de productos en el mercado, han llevado trayectorias independientes. Lejos de lo que sería sensato y deseable, la seguridad no es una variable integrada en la I+D nanotecnológica, sino que es algo que, a día de hoy, se realiza en una etapa post-mercado y no se espera que sea una realidad hasta 2020 (Savolainen, Backman, Brouwer, Fadeel, Fernandes, Kuhlbusch, Landsiedel, Lynch y Pylkkänen, 2013).

En la Unión Europea, el *Nanosafety Cluster* coordina la investigación sobre seguridad y salud humana y ambiental relacionada con la nanotecnología. Sus objetivos están

resumidos en el Cuadro 1. Así mismo está articulado en ocho grupos de trabajo: Materiales, Peligros, Exposición, Riesgo, Sistemas Biológicos, Bases de datos, Modelización y Difusión de resultados (Figura1)

Cuadro 1: Objetivos del Nanosafety Cluster

1. Favorecer la formación de un consenso sobre nanotoxicología en Europa.
2. Proporcionar un interlocutor único con entes externos.
3. Evitar la duplicidad de trabajo y mejorar la eficiencia.
4. Mejorar la coherencia de los estudios nanotoxicológicos y armonizar métodos.
5. Proporcionar un foro de discusión, resolución de problemas y planificación de la I+D en Europa.
6. Proporcionar, a las distintas partes interesadas de la industria y al público general, información sobre los riesgos de los nanomateriales para la salud humana y para el medio ambiente.
7. Generar sinergias y colaboración entre los proyectos, para maximizar el impacto y cooperación internacional.

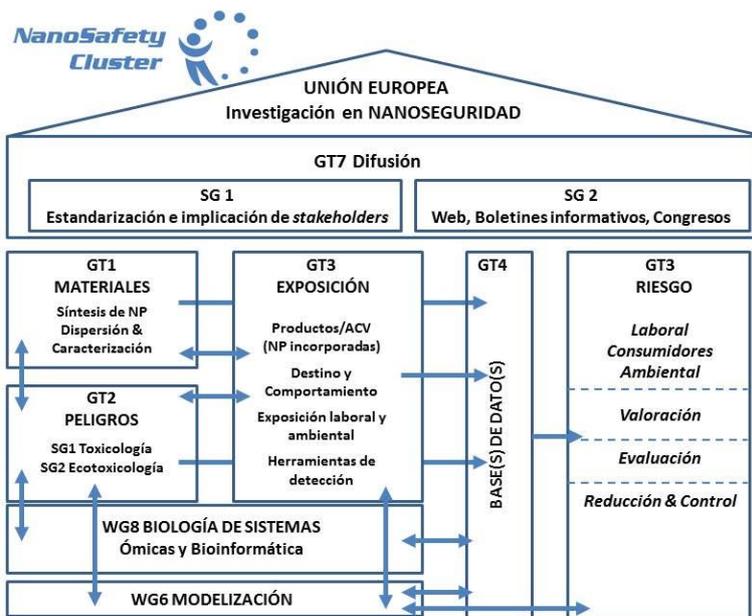


Figura 1. Grupos de trabajo (GT) del Nanosafety Cluster de la Unión Europea (Nanosafety Cluster Review Meeting, 2014)

En líneas generales la Unión Europea ha experimentado un reforzamiento de la actitud de prudencia que ya presentaba de partida. Así, si en 2009 el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados (CCRSERI) (SCENIHR en el acrónimo anglosajón) afirmaba: *“se han demostrado los peligros que diversos nanomateriales fabricados entrañan para la salud y el medio ambiente. Los peligros identificados indican que los nanomateriales tienen efectos tóxicos potenciales en el ser humano y el medio ambiente. Sin embargo, es preciso señalar que no todos*

los nanomateriales inducen efectos tóxicos. Algunos nanomateriales fabricados se han venido utilizando desde hace ya mucho tiempo (p. ej., negro de carbón y TiO₂) y su toxicidad es baja. Por consiguiente, la hipótesis de que una sustancia más pequeña es más reactiva, y por tanto más tóxica, no puede ser respaldada por los datos publicados. A este respecto, los nanomateriales son similares a productos químicos o sustancias normales, en el sentido de que algunos pueden ser tóxicos y otros no". Esta opinión no contemplaba la expresada anteriormente por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC -International Agency for Research on Cancer-), que en 2006 reevaluó el potencial cancerígeno del dióxido de titanio y pasó a considerarlo como posible carcinógeno humano (categoría 2B). En 2013, sin embargo, ya reconoce que hay evidencia de que algunas nanopartículas son tóxicas pero que sin embargo, aún falta conocimiento científico al respecto, por lo que recomienda que se adopte el principio de precaución.

En EEUU, la preocupación por el problema la ilustra el incremento en las tasas de crecimiento, tanto en términos absolutos como relativos, de las partidas presupuestarias para la financiación de la seguridad humana y ambiental, EHS en el acrónimo anglosajón, dentro de la National Nanotechnology Initiative (NNI), el plan nacional estadounidense para coordinar la inversión en investigación y desarrollo, en la escala nanométrica, de la ciencia, la ingeniería, la tecnología y actividades de soporte relacionadas entre 26 agencias y programas. La inversión acumulada hasta la fecha es de 21.000 millones de dólares. Tras la reestructuración del 2014, el programa quedó vertebrado en cinco áreas principales que se reparten los 1.500 millones de dólares presupuestados para el año fiscal 2015 como se indica en la figura 2.

- Seguridad Humana y Ambiental
- Áreas propias
- Investigación básica
- Aplicaciones dispositivos y sistemas
- Infraestructuras e Instrumentación

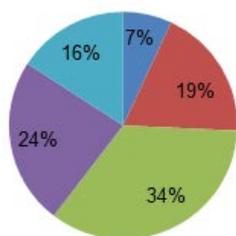


Figura 2. Presupuesto de cada una de las áreas componentes de la NNI (National Nanotechnology Initiative, 2014)

Año fiscal	Inversión R+D en HSE	% EHS de la inversión total NNI
2006	37.7	2.8%
2007	48.3	3.4%
2008	67.9	4.4%
2009	74.5	4.4%
2010	91.6	5.1%
2011	85.6	6.6%
2012	123.5	5.8%

Tabla 2 Financiación de la NNI de la investigación sobre seguridad y salud humana y ambiental durante los ejercicios fiscales de 2006 a 2009, (Roco, Chad, Mikin, Hersam, 2010)

La seguridad es, sin duda, uno de los factores fundamentales para garantizar el crecimiento y la comercialización de los nuevos productos y servicios que nos brindará la nanotecnología, tal y como los consejeros en materia de ciencia y tecnología del presidente Barack Obama le hicieron saber en 2013. Liderados por John P. Holdren y Eric Lander, del Broad Institute de Harvard y del MIT, advertían en su informa de

ese año relativo a la revisión de la NNI (President's Council of Advisors on Science and Technology, 2013), sobre la necesidad urgente de centrar los esfuerzos en los aspectos de seguridad y salud laboral (Galera, 2014b)

Cuadro 2: Recomendaciones del PCAST sobre Seguridad Humana y Ambiental

Los esfuerzos para afrontar las cuestiones de seguridad laboral son limitados debidos a la ausencia de investigación y de información rigurosa sobre la población de trabajadores expuestos y por las actitudes y las prácticas de los empleadores hacia los temas de riesgos laborales.

De mayor preocupación es la falta de coherencia entre las actitudes de los empleadores hacia el riesgo y el papel de la regulación en la mitigación del riesgo que revela una reciente encuesta realizada a empresarios de nanotecnología.

Dependiendo del tipo de material, entre el 37 % y el 58 % de los empleadores creen (están, de acuerdo o muy de acuerdo) que los nanomateriales plantean riesgos ente moderados y altos para la salud humana y/o el medio ambiente;

el 84 % cree que la seguridad en el trabajo debe tener prioridad sobre los avances científicos y tecnológicos, el 59 por ciento cree que demorar la comercialización de la nanotecnología, hasta que los estudios de seguridad sean completados, privará a la sociedad de demasiados beneficios potenciales.

El 56% cree que la falta de información es un impedimento en la implementación de las prácticas de salud y seguridad de nano-específicas,

el 77 % cree que las empresas están mejor informadas acerca de sus propias necesidades de seguridad en el trabajo que los organismos gubernamentales.

Dado que se están generando nuevos conocimientos relevantes para la salud ocupacional, la OSHA [el órgano de la Administración de los EEUU responsable de la seguridad y salud laboral -Occupational Safety and Health Administration-] debe intensificar sus esfuerzos de colaboración con las empresas para desarrollar e implementar programas de comunicación de riesgos y formación de los empleados responsables utilizando la información más actualizada disponible.

La investigación en seguridad y salud humana y ambiental realizada en la última década por instituciones y centros de investigación públicos y privados, ha producido avances, pero queda aún por despejar mucha incertidumbre sobre los riesgos "nano". Por ello la EPA (Agencia de protección medioambiental de Estados Unidos– Environmental Protection Agency–), solicitó al National Research Council un estudio independiente para desarrollar una estrategia de investigación de los aspectos sobre seguridad humana y ambiental de los nanomateriales artificiales. Para ello se constituyó el *Committee to Develop a Research Strategy for Environmental, Health, and Safety Aspects of Engineered Nanomaterial*", (2012) que reconoce:

a) para los desarrolladores, los reguladores y los consumidores de

productos nanotecnológicamente habilitados, siguen existiendo incertidumbres sobre la variedad y cantidad de nanomateriales en el comercio o en desarrollo, sus posibles aplicaciones, y los riesgos potenciales

b) no existe conexión e integración suficiente entre la generación de datos y el análisis sobre riesgos emergentes y las estrategias para la prevención y gestión de dichos riesgos

c) no sólo es que se necesite investigar más, sino que ni tan sólo las lagunas de conocimiento identificadas en muchos talleres científicos en la última década no se han abordado ni con la determinación ni con la investigación necesaria.

En los puntos siguientes se identificarán los principales tipos de nanomateriales con los que se está trabajando actualmente y los sectores y productos en que se aplican.

3. Definición de nanomaterial y principales tipos de nanomateriales

A día de hoy, no hay ninguna definición unánime e internacionalmente reconocida de lo que es un nanomaterial. Ello supone un obstáculo importante a la hora de regular por cuanto, en función de los criterios que se adopten, idénticas sustancias quedarán fuera o dentro de la definición y deberán, o no, cumplir las medidas que se arbitren en futuras regulaciones. Con todo, las distintas definiciones de nanomaterial disponibles tienen en común dos características:

a) el nanomaterial debe presentar al menos una dimensión externa en la escala nanométrica y que:

b) debido a ello, el nanomaterial debe presentar un comportamiento distinto al que tiene el material de idéntica composición en tamaño no nanométrico, esto es mayor de 100 nm.

Así, por ejemplo, el oro a tamaño mayor de 100 nm es amarillo, bien se trate de una pepita de 2mm o de un lingote de 200mm, es conductor, no es magnético y es químicamente inerte; sin embargo el oro por debajo de 100 nm es rojo, pierde conductividad entre 1-3 nm, se vuelve magnético a 3nm y es muy reactivo.

La explicación de tales fenómenos radica en que el marco de comprensión del comportamiento individual de átomos y moléculas es la física cuántica, mientras que el movimiento de colecciones masivas de átomos y moléculas, como objetos físicos, bajo la influencia de fuerzas, se describe mejor a través de la mecánica clásica o física Newtoniana. La nanotecnología se sitúa entre estos dos dominios y como consecuencia, entraña la posibilidad de revelar y explotar fenómenos únicos (Hansen, Maynard, Baun, Tickner, 2008) con la creación de nanomateriales artificiales. El grafeno, por ejemplo, es el material más ligero conocido y es 300 veces más resistente que el acero.

El disponer de una definición internacionalmente aceptada facilitaría sin duda la regulación que por otro lado, y como se ha visto, afectaría a prácticamente todos

los sectores económicos. El consenso sigue siendo complicado, como lo muestra el hecho que la Comisión Europea haya proporcione una recomendación (sic) de definición (CE, 2011) y no una definición definitiva. De momento pues, disponemos de una recomendación que dice: *Por «nanomaterial» se entiende un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm.*

En casos específicos y cuando se justifique por preocupaciones de medio ambiente, salud, seguridad o competitividad, el umbral de la granulometría numérica del 50 % puede sustituirse por un umbral comprendido entre el 1 % y el 50 %.-

Los fullerenos, los copos de grafeno y los nanotubos de carbono de pared simple con una o más dimensiones externas inferiores a 1 nm deben considerarse nanomateriales.

Los términos «partícula», «aglomerado» y «agregado» se definen como sigue:

- a) *«partícula»: una parte diminuta de materia con límites físicos definidos;*
- b) *«aglomerado»: un conjunto de partículas débilmente ligadas o de agregados en que la extensión de la superficie externa resultante es similar a la suma de las extensiones de las superficies de los distintos componentes;*
- c) *«agregado»: una partícula compuesta de partículas fuertemente ligadas o fusionadas.*

Un material debe considerarse incluido en la definición del punto 2 cuando la superficie específica por unidad de volumen del material sea superior a 60 m²/cm³. No obstante, un material que, según su granulometría numérica, es un nanomaterial debe considerarse que respeta la definición del punto 2, incluso si el material tiene una superficie específica inferior a 60 m²/cm³.

Según la ISO TS 80004-1, un nanomaterial es un material que presenta al menos una dimensión en la escala nanométrica o que posee una estructura interna o de superficie en dicha escala.

En general se distingue entre los nanomateriales libres o nano-objetos - sean nanopartículas, nanofibras, nanotubos o nanoplatos- de los nanomateriales estructurados que son aquellos materiales que presentan una estructura interna o de superficie de tamaño nanométrico y entre los que se encuentran los agregados y aglomerados de nano-objetos, los nanocomposites o los materiales nanoporosos (Figura 3).

NANOMATERIALES ARTIFICIALES			
NANO-OBJETOS		MATERIALES NANOESTRUCTURADOS	
Nanopartículas		Agregados y aglomerados de nano-objetos.	
Nanofibras, nanotubos		Nanocomposites: nano-objetos incorporados en una matriz o en una superficie.	
Nanoplatos		Materiales nanoporosos	

Figura 3. Las dos grandes familias de nanomateriales artificiales, (INRS, 2012)

Los nanomateriales artificiales o manufacturados, son aquellos de producción humana intencional con propósitos de aplicación precisos y con unas propiedades específicas. Algunos de ellos llevan años instalados en el mercado en toneladas significativas como el negro de carbono, el dióxido de titanio, el aluminio, el carbonato de calcio o la sílice amorfa. Otros, más recientes se fabrican en cantidades mucho menores, como los nanotubos de carbono, los dendrímeros, las gotas cuánticas o el grafeno.

Los nanomateriales incidentales, también conocidos como partículas ultrafinas de (tamaño inferior a 0.1 micras) son también de origen humano, pero se distinguen de los artificiales en que no han sido producidos de forma intencionada, sino que son resultado, generalmente, de procesos mecánicos o térmicos como los humos de soldadura, los humos de los motores de combustión etc. En la naturaleza también hay presentes nanomateriales como las cenizas volcánicas o la sal de mar en suspensión en el aire.

A la vista de la figura 3 se desprende que una sustancia de una determinada composición química puede presentarse en diferentes formas en la escala nanométrica, y con ello, tener diferentes propiedades, entre otras la toxicidad. Así pues habrá que definir cuáles son las variables relevantes para caracterizar un nanomaterial. Todavía se está investigando en este campo de caracterización de los nanomateriales, el mapa de ruta de investigación sobre materiales del Nanosafety Cluster ilustra cuándo se espera que estará disponible el conocimiento en esta área (Tabla 3). Pero en conjunto, hasta 2025 no se culminarán todos los objetivos previstos.

Tabla 3 Previsión de consecución de los objetivos del grupo de trabajo 1 sobre Caracterización de nanomateriales, del Nanosafety Cluster, (Nanosafety Cluster, 2013)

Hito	Tema	Hacia 2015	Hacia 2020	Hacia 2025
Clasificación de Materiales	Definición	Disposición de sistemas de clasificación		
	Denominación de estructuras	Disposición de ontologías		
	Caracterización de NM en matrices complejas	Métodos robustos para la determinación del tamaño de NM	Métodos para la caracterización de superficie de NM	Métodos para caracterizar NM multicomposite
	Tests y NM de referencia	Sistemas de tests de NM NM certificados en biofluidos de referencia	Listados completos de NM testados	
	Validación	Versiones etiquetadas validadas de tests de NM	Validación de métricas clave de impactos	Correlación entre captación, forma e impactos
Fundamentos de medida	Métodos versátiles	Disposición de métodos versátiles de referencia		
Bio-nano-interacciones	Biomoléculas para la captación, transporte, etc.	Biointeracciones de referencia		
	Impactos de los NM en la función de las proteínas	Interactomas de referencia	Propiedades de los NM que provocan disfunciones de señalización	
Ingeniería de Nanomateriales	Conceptos de seguridad en el diseño		Seguridad en el diseño de nuevos NM de enfoque "bottom-up"	
Métricas para la valoración del peligro de NM	Descriptores clave	Descriptores no esféricos definidos	Listados completos sobre NM de referencia no esféricos	

La complejidad del asunto y el reto que supone para la investigación está ilustrado en la figura 4 que muestra las principales variables consideradas en estos momentos (INRS, 2014).

NANOMATERIALES Nanopartículas, Nanofibras, Nanoplatos					
COMPOSICIÓN QUÍMICA	PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	MODIFICACIONES DE SUPERFICIE	FORMA	DIMENSIONES	ESTADO DEL NM
Carbón	Solubilidad	Sin recubrimiento	Esfera	Distribución granulométrica	Polvo
Metal	Superficie		Cubo		Suspensión
Óxido metálico	Carga	Con recubrimiento	Tubo	Nº de partículas, agregados, aglomerados	Gel
Polímero	Hidrofobicidad	Químicamente modificada	Fibra		Coloide
Biomolécula	Biopersistencia		Plato		

Figura 4. Características físico-químicas de los nanomateriales, (INRS, 2014)

De este modo se entiende que haya muchos tipos de nanomateriales de una misma composición, como muestra la figura del JRC que ilustra las diferentes clases de nano TiO₂ que tiene registrado y que en función del tamaño medio de partícula presenta un área superficial que oscila entre los 10 m²/g a los 320 m²/g.

Tabla 4 Diferentes registros de Dióxido de Titanio catalogados en el repositorio de nanomateriales del Centro Común de Investigación (JRC), (JCR, 2011)



List of materials in the JRC Nanomaterials (NM) Repository

Last update: 27 October 2011

NM code	Type of material ¹	Label name	Mean particle size [nm]	Primary particle or crystal size [nm]	Specific surface area [m ² /g]	Average Length ² [micron]	Average Diameter ³ [nm]	Other information
NM-100	Titanium Dioxide	Titanium Dioxide	267	42 - 90	10			anatase
NM-101	Titanium Dioxide	Titanium Dioxide	38	6	320			anatase
NM-102	Titanium Dioxide	Titanium Dioxide, anatase	132	20	90			anatase
NM-103	Titanium Dioxide	Titanium Dioxide thermal, hydrophobic	186	20	60			rutile
NM-104	Titanium Dioxide	Titanium Dioxide thermal, hydrophilic	67	20	60			rutile
NM-105	Titanium Dioxide	Titanium Dioxide rutile-anatase	95	22	61			rutile-anatase
NM-110	Zinc Oxide, uncoated	Zinc Oxide	150	42	13			
NM-111	Zinc Oxide, coated	Zinc Oxide coated triethoxycaprylsilane	140	34	16			
NM-200	Silicon Dioxide	Synthetic Amorphous Silica PR-A-02	47	20	230			precipitated
NM-201	Silicon Dioxide	Synthetic Amorphous Silica PR-B-01	62	8-15	160			precipitated
NM-202	Silicon Dioxide	Synthetic Amorphous Silica PY-AB-03	108	8-15	200			thermal
NM-203	Silicon Dioxide	Synthetic Amorphous Silica PY-A-04	137	8-20	226			thermal
NM-204	Silicon Dioxide	Synthetic Amorphous Silica PR-A-05	75	8-15	144			precipitated

3.1 Tipos de nanomateriales

La Unión Europea en su COM 2012/ 572 establece ocho tipologías de nanomateriales: inorgánicos no metálicos, metales y aleaciones metálicas, nanomateriales de carbono, nanopolímeros y dendrímeros, gotas cuánticas, nanoarcillas, nanocomposites y otros.

Tipologías de Nanomateriales

Inorgánicos no metálicos	<ul style="list-style-type: none"> - Sílice amorfa sintética (SiO₂) - Dióxido de titanio (TiO₂) - Óxido de zinc - Óxido de aluminio - Hidróxido de aluminio y oxo-hidróxidos de aluminio - Óxidos de hierro 	<ul style="list-style-type: none"> - Dióxido de cerio - Dióxido de zirconio - Otros nanomateriales : titanato de bario, sulfato de bario, titanato de estroncio, carbonato de estroncio, óxido de indio y estaño y óxido de antimonio y estaño. - Carbonato cálcico
Metales y aleaciones metálicas	<ul style="list-style-type: none"> - Oro - Plata - Otras nanopartículas metálicas: Platino y aleaciones de paladio - Nanopulvos de cobre, Nanopartículas de hierro, Nanopartículas de titanio - Níquel, cobalto, aluminio, zinc, manganeso, molibdeno, tungsteno, lantano y litio 	
Nanomateriales de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Fullerenos - Nanotubos de carbono y nanofibras de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> - Negro de humo (carbon black) - Copos de grafeno
Nanopolímeros y dendrímeros	<ul style="list-style-type: none"> - Nanopartículas de polímeros - Nanotubos, nanocables y nanovarillas de polímeros - Fibras de Poliglicidilmetacrilato - Nanocelulosa - Películas poliméricas nanoestructuradas - Nanoestructuras de poliacrilonitrilo - Dendrímeros 	
Gotas cuánticas		
Nanoarcillas		
Nanocomposites		
Otros	<ul style="list-style-type: none"> Nitrógeno y compuestos de fósforo Otros (ver Anexo 3 de la COM (2012) 572) 	

Hay que tener presente que, a pesar de toda esta diversidad, la cantidad total anual de nanomateriales en el mercado mundial se sitúa entorno a los 11 millones de toneladas, por un valor de 20.000 millones de euros (COM 2012/572, pag. 10). Por volumen total, el primer puesto lo ocupa el negro de carbón, que supone en torno al 85% de los nanomateriales en circulación. El segundo lugar lo ocupa la sílice amorfa sintética, con un 12% del total. Otros nanomateriales de relevancia son el nanodióxido de titanio, el nanóxido de cinc, los fullerenos, los nanotubos de carbono y la nanoplata. Seguidamente (Tabla 5) se indican los nanomateriales más utilizados, las nuevas propiedades debidas a su tamaño y las aplicaciones que presenta

Tabla 5 Principales tipos de nanomateriales, propiedades y aplicaciones (Ostiguy et al. 2014)

Tipo de nanomaterial	Nuevas propiedades	Aplicaciones
C60 fullerenos	Alta afinidad electrónica	Mejora de las propiedades magnéticas, catalizadores, pirólisis, lubricantes, células solares, membranas electrolíticas, membranas de intercambio iónico, almacenamiento de oxígeno y metano, portadores de fármacos
TiO2	Propiedades ópticas anti ultravioleta, transparencia, efecto fotocatalítico	Células solares, cremas solares protectoras de la radiación ultravioleta (UV), pintura antiUV, tratamiento medioambiental, tratamiento de superficie de madera, agente antimicrobiano, materiales autolimpiables, agente antimicrobiano, tratamientos contra el cáncer
Puntos cuánticos	Propiedades colorimétricas y electrónicas manipulables con precisión	Colorantes, nanoelectrónica y ordenadores cuánticos, diagnóstico por imagen, terapia médica, células solares, catalizadores Marcador de múltiples biomoléculas para monitorizar eventos celulares complejos y cambios asociados a enfermedades Tecnología óptica Diagnóstico de enfermedades y tecnologías de detección
Nanotubos de Carbono	Buen conductor eléctrico y gran fuerza mecánica	Nanoelectrónica y los ordenadores cuánticos, materiales de aeronaves ultra fuerte, disipación estática, el almacenamiento de hidrógeno, biosensores, sensores químicos, polímeros blindaje electromagnético, supercondensadores, materiales compuestos reforzados, cables extra fuertes, textiles, piezas extremadamente ligeras para vehículos terrestres, y el espacio, aditivo
Polímeros, vidrios, nanocanales	"Miniaturización" de reacciones químicas	Laboratorios en un chip
Liposomas	Componentes biodegradables	Administración de fármacos diana (actúan exclusivamente sobre el sitio deseado)
Plata	Agente antimicrobiano	Utillaje/ equipos médicos, productos de consumo, embalaje de alimentos, textiles antiodorantes, antiestáticos, aparatos electrónicos y electrodomésticos, cosméticos y desinfectantes Incorporado en una amplia gama de dispositivos médicos, incluidos cementos, instrumental y máscaras quirúrgicas
Materiales fotónicos	Transmisión de la luz de modo ajustable	Telecomunicaciones, ordenadores ópticos
Grafeno	Conductividad eléctrica	Sustitución de las piezas de silicio, transistores de alta frecuencia
Óxidos metálicos (p. ex. Zn, Fe, Ce, Zr)	Área superficial, propiedades ópticas	Cerámicas, recubrimientos anti-ralladuras para lentes, cosméticos y cremas solares
Nanoarcillas (nanoclays)	Catálisis, fuerza, dureza, resistencia al calor y al fuego	Refinería de petróleo, modificación de las propiedades de compuestos y materiales, resistencia al fuego, refuerzo mecánico, aditivos de caucho
Negro de Humo o Carbon Black	Área superficial	Industrias del caucho, pintura y tintas
Humo de Sílice	Propiedades reológicas	Hormigones especiales y de alta calidad para la construcción de puentes, carreteras, estructuras marinas, playas de estacionamiento, sistemas de purificación y distribución de agua; industria cerámica, morteros, aditivos para plástico y caucho
Dendrimeros	Hidrofilicos e hidrofóbicos	Aplicaciones médicas y biomédicas Macromoléculas polimerizadas, estructuras altamente ramificadas con una nanocavidad o canal interior con propiedades diferentes a las de la zona externa de la macromolécula. Transportadores de drogas (contra el cáncer, bacterias, virus etc.) con capacidad para mejorar la solubilidad

Como puede comprobarse, los nanomateriales tienen aplicación en todos los sectores. A efectos de seguridad y salud laboral habría que identificar, para cada uno de ellos, los productos que incorporan nanomateriales y las actividades o procesos en que se utilizan. Recientemente el INRS (2014) ha proporcionado una guía de gran utilidad a la hora de identificar los principales nanomateriales en uso actual y sus aplicaciones en ocho sectores: agroalimentario, cosmética, construcción, energía, pinturas, farmacéutico, industrias del plástico y el caucho y los sectores textil, del papel y el cartón. A continuación y a modo de ilustración se analiza el caso del sector de la construcción.

3.2 Un ejemplo: el sector de la construcción

La construcción es uno de los sectores donde la incorporación de nanopartículas ha tenido más recorrido. Ya sea en cementos, revestimientos de fachadas, aislantes, pavimentos, cristales, pinturas o cerámicas, encontramos importantes mejoras vinculadas al uso de la nanotecnología. Estos nuevos materiales tienen unas ventajas significativas, que pueden ir desde ser autolimpiables – con el consiguiente ahorro en mantenimiento y consumo de agua y productos de limpieza –, hasta ofrecer mayor resistencia mecánica, más flexibilidad o resistencia a la corrosión. También pueden intervenir en la eliminación de los contaminantes atmosféricos gracias a sus efectos catalíticos o incluso monitorizar la salud del material y detectar patologías, entre otras mejoras (Galera, 2014a).

La tabla 6 identifica los principales tipos de nanopartículas presentes en los materiales de construcción, las propiedades que les confieren y las fases de obra en las que se utilizan. De todas ellos hay evidencias científicas y documentadas que cuestionan y/o muestran su toxicidad humana y ambiental. Señalada la incertidumbre sobre el riesgo que los nanomateriales pueden representar para la seguridad humana y ambiental, cabe preguntarse quienes y dónde están expuestos a estos nanomateriales.

Tabla 6. Nanomateriales de la construcción, productos en que se encuentran propiedades que confieren y fases de obra en que se utilizan².

Nanomaterial	Productos	Propiedades	Fase de obra
Dióxido de titanio TiO₂	Cemento/Hormigón Cristal Baldosas/azulejos Planchas aluminio Películas de plástico Pérgolas Pinturas y enlucidos de cemento	Resistencia a compresión Resistencia a flexión Anti-bacteriano Autolimpiante super hidrófilo Antivaho Purificador de aire fotocatalítico Enfriador de superficies	Cimentaciones Estructura Fachadas Cubiertas Acabados Instalación captación solar Pavimentos Mobiliario urbano Carreteras
Oxido de Aluminio Al₂O₃	Cemento/Hormigón	Resistencia a compresión Resistencia a flexión Resistencia a la abrasión	Cimentaciones Estructura
Oxido de Zirconio ZrO₂	Cemento/Hormigón	Resistencia a compresión Resistencia a flexión Resistencia a la abrasión	Cimentaciones Estructura
Oxido de Hierro Fe₂O₃	Cemento/Hormigón Recubrimientos epoxy de armaduras Madera	Resistencia a compresión Resistencia a flexión Resistencia a la abrasión Conductividad Autocompactabilidad Anti-corrosión	Cimentaciones Estructura
Oxido de Silicio SiO₂	Cemento/Hormigón Cristal Pinturas Recubrimientos epoxy de armaduras Madera Aislamiento térmico y acústico de aerogel transparente	Resistencia a compresión Resistencia a flexión Resistencia a la abrasión Superhidrofóbico Aislante térmico y acústico Anti-corrosión	Cimentaciones Estructura Fachadas Cubiertas Ventanas Instalación de captación solar Acabados Pavimentos
Nanotubos de carbono CNT	Cemento/Hormigón Pinturas Cristal	Resistencia a tensión Elasticidad Propiedades térmicas Inhibición de roturas en fase inicial Anti-bacteriano Superhidrofóbico	Cimentaciones Estructura Acabados Ventanas
Nanofibras de carbono CNF	Cemento/Hormigón	Resistencia a tensión Elasticidad Propiedades térmicas Inhibición de roturas en fase inicial Conductividad Autocompactabilidad	Cimentaciones Estructura
Plata Ag	Pinturas	Anti-bacteriano	Acabados

² Àlex Andorra, Oriol Domingo, Alejandro Pacheco y César de Sosa, del Grupo de trabajo seguridad en la construcción. Proyecto realizado por alumnos del curso 2013-2014 de la asignatura de Proyectos, Grado de Ingeniería en Organización Industrial de la Escuela Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

A la vista de ello es fácil deducir que prácticamente todos los oficios relacionados con la construcción están trabajando con productos que incorporan nanopartículas. ¿Qué hacer entonces? La primera cuestión es si se conoce esta realidad. En principio sería lógico pensar que los profesionales de la construcción saben si los productos que manejan contienen o no nanomateriales, pero nada más lejos de la realidad: una encuesta, realizada en 2009 entre diferentes empresas de la construcción de 14 países europeos, pone de manifiesto que tanto empleadores como representantes de los trabajadores desconocían en mayoritariamente que utilizaban nano-productos (Figura 6). La encuesta fue realizada por la Federación europea de la industria de la construcción (FIEC) y por la Federación europea de trabajadores de la construcción y de la madera (EFBWW).

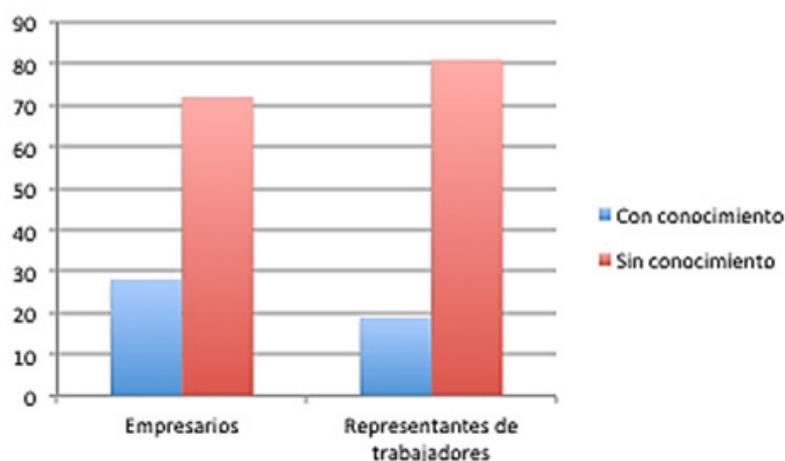


Figura 6. Nivel de conocimiento entre empleadores (azul) y representantes de los trabajadores (rojo) respecto a la presencia de nanomateriales en los productos que utilizan (van Broekhuizen y van Broekhuizen, 2009)

La cosa se complica con este escenario donde el 70% de los empleadores y el 80% de los representantes de los trabajadores de la construcción no son conscientes de si están utilizando o no nanomateriales. Lamentablemente esta circunstancia es extensible a prácticamente la mayoría de sectores (Zalk, Paik y Swuste, 2009).

La Agencia europea de seguridad y salud laboral (EU-OSHA) dedica en su portal web una página al tema de los riesgos nano. En ella especifica la legislación vigente y deja bien clara la obligación del empresario de evaluar y gestionar los riesgos de los nanomateriales en el lugar de trabajo. Señala además, que dada la incertidumbre actual y que *existen importante motivos de preocupación (sic)* sobre los riesgos nano para la seguridad y salud humana, los empresarios, junto con los trabajadores, deberán aplicar un enfoque de precaución en la prevención de riesgos laborales.

Respecto a la legislación de aplicación, señala cuatro fuentes importantes: la Directiva marco 89/391/CEE, la Directiva sobre agentes químicos 98/24/CE, la Directiva relativa a los agentes carcinógenos o mutágenos 2004/37/CE y la legislación sobre sustancias

químicas REACH y CLP. Es relevante señalar que la Directiva sobre carcinógenos o mutágenos, en su Anexo II dedicado a la *Recomendaciones prácticas para el control médico de los trabajadores (sic)* en su punto 2 especifica que *De acuerdo con los conocimientos más recientes en el campo de la medicina del trabajo, se podrá decidir la realización de otras pruebas para cada uno de los trabajadores sometidos a control médico*. Está claro pues, la trascendencia, para los trabajadores, y la importancia, para los empresarios, que la vigilancia tecnológica y la formación continua de los profesionales va a tener sobre la gestión de la prevención relacionada con el trabajo con nanomateriales.

A la vista del impacto de la nanotecnología en todos los sectores y en todo el ciclo de vida del nanomaterial, desde su producción, hasta el reciclaje o tratamiento como residuo, cabe figurarse que no son pocos los empleadores con responsabilidad legal directa de llevar a cabo nuevas evaluaciones de riesgos, por cuanto la introducción de nanomateriales, o de productos que los contienen, puede suponer una alteración de las condiciones de trabajo por aparición de un riesgo potencial no evaluado.

Para asegurar el cumplimiento de esta obligación legal de velar por la seguridad y salud de los trabajadores que manipulan productos que contienen nanopartículas, es necesario antes identificar cuáles son los puestos de trabajo y las actividades que deben ser objeto de observación a fin de identificar las nanopartículas involucradas y de recabar información toxicológica sobre las mismas.

4. Toxicidad

El riesgo evoluciona: emerge, madura y muere. La fase de aparición es intensiva en conocimiento. El conocimiento disponible es inadecuado para comprender comprensivamente los procesos (fenómenos), hay una inercia a aplicar asunciones fiables. Enfoques técnicos y marcos conceptuales que funcionaron con éxito en el pasado son copiados ciegamente. Viejas técnicas que han funcionado con éxito en asegurar unas mejores condiciones de vida, son las más difíciles de reemplazar, precisamente por su propio éxito. El riesgo en sí mismo es solo una expectativa, una evaluación del análisis de posibles eventos con posibles efectos adversos. (Savolainen, et al. 2014)

Actualmente no se dispone de un conocimiento consolidado en la caracterización de nanomateriales, ni de la modelización del comportamiento de éstos una vez liberado a diferentes medios, que aporte un entendimiento comprensivo como para establecer un modelo genérico de toxicidad. Por un lado, a la inadecuación de las herramientas y de los modelos disponibles, se le suma la dificultad de actualización del conocimiento al ritmo requerido por la creación y la innovación de nuevos productos. Por otro lado, a la extraordinaria variabilidad de los nanomateriales, se añade el desconocimiento sobre su comportamiento una vez liberado al ambiente en forma de a) nanopartícula libre, b) nanopartículas agregadas, c) nanopartículas ligadas a una matriz o d) nanopartículas

funcionalizadas. Los factores ambientales influyen en el grado de aglomeración y agregación (Figura 7). Esto requiere que durante los próximos años se desarrollen nuevos paradigmas de evaluación de la seguridad para resolver este problema (Savolainen et al, 2013)

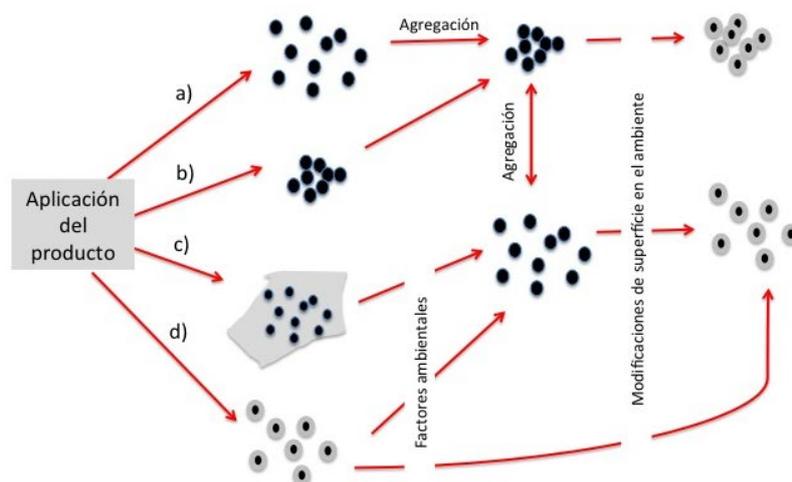


Figura7. Diferentes posibilidades de comportamiento de las nanopartículas una vez liberadas al medio (Nowack y Bucheli, 2007)

La investigación en nanotoxicología requiere un enfoque interdisciplinario (toxicología, ciencia de los materiales, medicina, biología molecular, bioinformática, etc.) para alcanzar una adecuada evaluación del riesgo (Oberdörster, Oberdörster, Oberdörster 2005). La investigación de las partículas ultrafinas (PUF) es el punto de partida de la nanotoxicología. Una de las hipótesis más importantes es que el peligro de las nanopartículas puede estar relacionado con propiedades físico-químicas específicas distintas a las que se han utilizado tradicionalmente en la industria química, como por ejemplo: tamaño de partícula, forma, estructura cristalina, área superficial, química superficial y carga superficial. Ya Oberdörster et al. (1990) y Ferin et al (1990) mostraron que el dióxido de titanio ultrafino (TiO_2) y el óxido de aluminio (Al_2O_3) de 30 y 20 nm, respectivamente, inducían una reacción inflamatoria muy notable en el pulmón de ratas comparada con la de las partículas de 250 y 500 nm. Esto es, un daño tamaño dependiente. Dos años después Oberdörster et al. (1992) informan que el estado cristalino de nanopartículas de TiO_2 influye en su toxicidad y que el área superficial es mejor descriptor de los efectos adversos en ratas, que la masa. Recordemos que, a igual masa, podemos tener diferente área superficial con distinto tamaño de partícula.

La actividad biológica y la biocinética dependen de muchos parámetros, los principales a considerar para una correcta caracterización de nanopartículas en estudios toxicológicos son:

- Masa, concentración
- Composición química (pureza e impurezas) Solubilidad

- Área específica
- Número de partículas
- Tamaño de partícula y distribución
- Forma, porosidad
- Grado de aglomeración / agregación
- Propiedades de superficie (carga / potencial zeta, reactividad, composición química, grupos funcionales, potencial redox, potencial para generar radicales libres, presencia de metales, cobertura de superficie, etc.)
- Biopersistencia
- Estructura cristalina
- Hidrofobicidad,/hidrofilicidad
- Lugar de deposición pulmonar
- Edad de las partículas
- Productor, proceso y fuente del material utilizado

Todos estos parámetros pueden modificar las respuestas y las interacciones celulares: potencial inflamatorio, translocación a través de epitelios desde el portal de entrada hacia otros órganos, translocación por los axones y dendritas de las neuronas, inducción y estrés oxidativo, unión a proteínas y receptores y localización en la mitocondria.

Las nanopartículas pueden penetrar en el cuerpo por vía inhalatoria, por vía dérmica, por ingestión y por vía parenteral.

Cuando las nanopartículas se inhalan, determinadas fracciones de tamaño se depositan en el tracto respiratorio. Debido a su tamaño pueden ser captadas por las células epiteliales y endoteliales y alcanzar el torrente sanguíneo por donde son transportadas hasta órganos diana como la médula ósea, los nódulos linfáticos, el bazo o el corazón (Oberdörster et al (2007). También se ha observado el alcance del sistema nervioso central y de los ganglios por translocación a lo largo de los axones y dendritas de las neuronas. La biocinética de las nanopartículas es diferente de las partículas mayores.

En contacto con la piel, hay evidencia de penetración hasta la dermis seguida de translocación vía linfática hasta nódulos regionales linfáticos. Las nanopartículas liposolubles pueden transitar por el espacio intercelular de la capa córnea de la piel y pasar a través de las células, de los folículos capilares o de las glándulas sudoríparas (Monteiro-Riviere e Inman, 2006). Las nanopartículas pueden también almacenarse en la zona no vascularizada de la piel de donde no pueden ser eliminadas por los macrófagos. Una vez absorbidas vía dérmica también pueden alcanzar el torrente sanguíneo tras haber traspasado todas las capas de la piel.

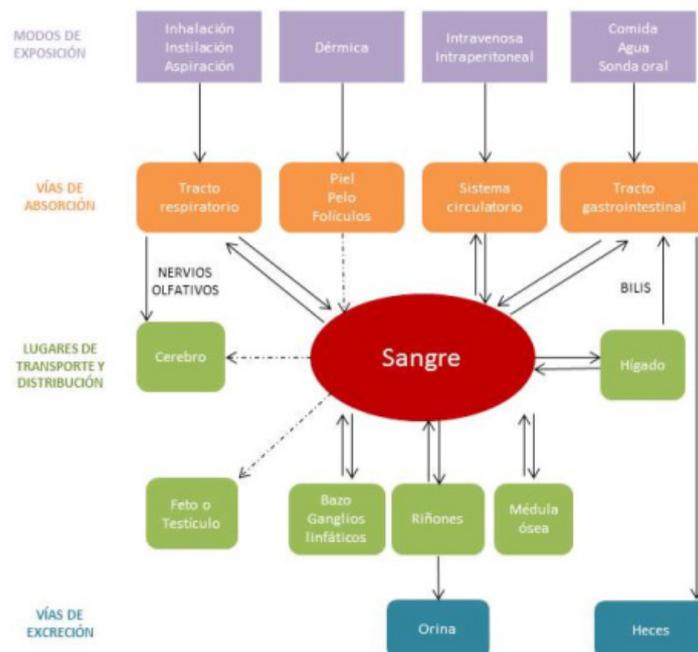


Figura 8. Toxicocinética y lugares de acumulación de las nanopartículas (Shi et al, 2013)

Por ingestión puede darse una captación sistémica vía linfática, pero la mayoría de las nanopartículas son expulsadas vía heces. En el torrente circulatorio, pueden ser distribuidas por todo el organismo, y ser captadas a nivel de hígado, bazo, médula ósea, corazón y otros órganos. Para ciertas nanopartículas puede darse translocación desde el intestino hasta la sangre y linfa, pero depende del tamaño, carga superficial, hidrofiliadad/hidrofobocidad, ligandos biológicos, recubrimientos químicos, etc. (Zhao et al., 2007). Así, por ejemplo, la translocación sería mayor para nanopartículas hidrofóbicas y para nanopartículas pequeñas.

Una vez han penetrado en la células las nanopartículas pueden interactuar con los orgánulos celulares (mitocondrias, retículo endoplasmático rugoso, etc.) e inducen estrés oxidativo, como principal mecanismo de acción, aunque también se han descrito metilaciones de las histonas y otras alteraciones del ADN con efectos epigenéticos que tienen un papel en el desarrollo de enfermedades: cáncer (Dawson y Kouzarides, 2012; Migliore et al., 2011), enfermedades neurodegenerativas (Migliore y Coppédé, 2009), complicaciones cardiovasculares (Udali et al., 2012), alteraciones autoinmunes (Rodríguez-Cortez et al., 2011) y alteraciones de la conducta y desórdenes psiquiátricos (Miyake et al., 2012).

Recientemente Byrne, Ahluwalia, Boraschi, Fadeel y Gehr (2013) señalaban cómo las nanopartículas, en el medio biológico, pueden adquirir un recubrimiento de biomoléculas (proteínas, lípidos y polisacáridos) del entorno en el que se encuentran inmersas; tales modificaciones les confieren una identidad biológica, por lo que concluyen que, lejos de observar las nanopartículas como especies no interactivas, deben ser consideradas

y estudiadas como entidades biológicas, en las que su interacción con el ambiente es mediada por proteínas y otras biomoléculas que se adsorben (en superficie) a ellas. Por ello unos parámetros clave para caracterizar a estas nanopartículas son su naturaleza, la composición y la evolución de la bio-nano interficie. Ésta es clave para comprender, además de los revestimientos de superficie, la biocinética, los fenómenos de translocación y de alteración de las señales celulares. Estamos por tanto ante un cambio de paradigma en el enfoque toxicológico tradicional, puesto que un riesgo, como es el de los nanomateriales, enfocado en principio como químico, puede adquirir una naturaleza de riesgo biológico.

Tabla 7. Sumario de la toxicidad descrita entre determinados tipos de los principales nanomateriales (IRRST, 2008)

Tipo de Nanomaterial	Ruta exposición	Efectos sistémicos										
		Toxicocinética	Irritación	Agudo	Intermedio	Crónico	Neurológico	Inmunológico	Desarrollo	Reproductivo	Genotóxico	Cáncer
NTC Pared Simple	Inhalación			▲								
	Cutánea		▲■					■				
	Oral	▲										
	Otra	▲■		▲				■			■	
NTC Pared Múltiple	Inhalación	▲									▲	
	Cutánea											
	Oral											
	Otra	■										
Nanopartículas Inorgánicas	Inhalación	▲■		▲■	▲■	▲■					▲	▲■
	Cutánea	■									▲	▲■
	Oral	▲		▲	▲							
	Otra	▲■		▲	▲					▲	▲	▲
NP Orgánicas	Inhalación			▲								
	Cutánea	▲										
	Oral	▲										
	Otra	▲	▲	▲				▲	▲		▲	
Nanocápsulas Nanosferas Dendrimeros	Inhalación											
	Cutánea											
	Oral											
	Otra	▲		▲								
Gotas cuánticas	Inhalación											
	Cutánea	▲										
	Oral											
	Otra	▲							▲		▲	

Evidencias en estudios ▲ (animales) y ■ (humanos)

Son muchos los estudios que han proporcionado evidencias científicas sobre el impacto de determinados nanomateriales en sistemas biológicos, incluido el humano. En 2008 el IRSST publicó la segunda edición de *Health effects of Nanoparticles*, ordenando de forma comprensiva y en función de la ruta de exposición –inhalación, cutánea, oral y otras- la información disponible sobre toxicocinética, irritación, efectos sistémicos (agudos, intermedios y crónicos), afectación neurológica, inmunológica, del desarrollo, reproductiva, genotoxicidad y cáncer. Se consideraron los principales tipos de nanomateriales utilizados actualmente: Nanotubos de carbono de pared simple y de pared múltiple, nanopartículas inorgánicas, nanopartículas orgánicas, nanocápsulas, nanoesferas, dendrímeros y gotas cuánticas.

5. Discusión y conclusiones

El desarrollo de la nanotecnología ha adoptado una condición estratégica en las políticas de los países desarrollados debido a su enorme potencial y a la capacidad para abarcar problemas de calado mundial como el de la sostenibilidad, el tratamiento y detección precoz de enfermedades, la energía o la potabilización del agua. Con ello, la introducción en el mercado de productos que incorporan nanomateriales es una realidad creciente. Sin embargo existe un acuerdo internacional en el hecho de que los aspectos de seguridad humana y ambiental no se han contemplado con la misma diligencia que el de las aplicaciones comerciales.

El alcance del problema es de gran relevancia por cuanto todos los sectores de producción presentan un gran potencial de innovación y competitividad merced a la aplicación de la nanotecnología. Consecuentemente tiene un potencial impacto sobre la seguridad y la salud de las personas que trabajan en los centros donde se producen o manipulan productos que incorporan nanomateriales.

En muchos casos el uso de este tipo de productos supone una modificación de las condiciones de trabajo, por cuanto los nanomateriales (entre 1 y 100 nanómetros) representan un riesgo diferente al del mismo material a un tamaño superior a 100 nanómetros. Ello exige legalmente una nueva evaluación de los puestos de trabajo donde se manejan tales productos.

Los métodos clásicos de la toxicología son insuficientes para afrontar el reto que supone el estudio de las nanopartículas dado que todavía se está estudiando cómo caracterizarlas, no se dispone tampoco de suficiente instrumentación ni de las metodologías adecuadas para llevar a cabo los estudios. La enorme variabilidad de presentación y de comportamiento de las nanopartículas, que una vez liberadas, pueden agregarse, reaccionar, aglomerarse, y reaccionar con otras sustancias presentes en el medio, requiere de nuevos paradigmas y enfoques.

La evidencia científica disponible sobre la interacción de las nanopartículas y los nanomateriales en los sistemas vivos y en particular sobre la salud humana, es

suficiente para adoptar el principio de precaución y considerarlos como potencialmente peligrosos. Ello no es óbice para comprender que esta misma evidencia es insuficiente como para generar un corpus de conocimiento sobre nanotoxicología. Todavía queda mucha investigación por realizar, como pone de manifiesto las previsiones del *Nanosafety Cluster* de la Unión Europea, que no sitúa hasta 2025 la consecución de algunos los objetivos imprescindibles, como son la disponibilidad de métodos para la caracterización de nanomateriales complejos o la correlación entre captación, forma e impacto de los nanomateriales.

A menudo ambos conceptos –la certeza sobre la toxicidad de algunos nanomateriales y la falta de herramientas para caracterizar y pronosticar su toxicidad- se confunden. Tal confusión conduce a la *parálisis por análisis* (Hansen, Maynard, Baun, Tickner, 2008) es decir a no adoptar medidas de ningún tipo a la espera de tener resultados concluyentes.

Sin embargo tras una década de trabajo en seguridad y salud ocupacional, sí que se dispone de enfoques de gestión del riesgo nano (EU-OSHA, 2013a, IRSST, 2014, EU-OSHA 2014a) de metodologías cualitativas, herramientas de “*Control Banding*” (INSHT, 2014, EU-OSHA, 2013b), para la evaluación de riesgos en nanomateriales, de medidas preventivas validadas para prevenir los riesgos laborales por exposición a nanopartículas y a nanomateriales (NIOSH, 2013), de guías dirigidas a informar a quienes trabajan en instalaciones donde se manejan o producen nanomateriales (Ponce del Castillo, 2013, EU-OSHA, 2013b, 2013c, 2014 b), o a facilitar la identificación de nanomateriales en función del tipo de sector y actividad de las empresas (INRS, 2014).

En conclusión, el grado de conocimiento disponible a día de hoy sobre el impacto de la nanotecnología, en tanto que TFE, en la seguridad y salud laboral puede resumirse en tres ideas principales:

a) la primera es la necesidad de informar a empresarios y responsables de la administración de que el trabajo con nanomateriales supone una modificación de las condiciones de trabajo, por cuanto los nanomateriales (entre 1 y 100 nanómetros) pueden representar un riesgo diferente al del mismo material a un tamaño superior a 100 nanómetros;

b) en segundo lugar, el paradigma tradicional de la higiene industrial necesita ser adaptado y modificado para el caso de los nanomateriales. Sin embargo, a día de hoy se puede afirmar que es posible proteger la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a riesgos por exposición a NM, porque instituciones de referencia de todo el mundo han publicado guías de buenas prácticas y han identificado las mejores tecnologías disponibles para la gestión del riesgo nano;

c) finalmente, se pone de manifiesto la necesidad de formación para actualizar las competencias de los profesionales de la prevención para garantizar la seguridad de las personas expuestas a nanomateriales en su lugar de trabajo.

En resumen, actualmente se dispone de la información suficiente para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a riesgos nanos, sin embargo los principales obstáculos siguen siendo la falta de información sobre el tema, en los entornos laborales y de la administración pública con competencias en la materia, y consecuentemente, la insuficiente sensibilización de empleadores, representantes de los trabajadores y una adecuada formación de los técnicos de prevención en esta materia.

6. Referencias

Byrne, H., J. Ahluwalia, A., Boraschi, D., Fadeel B., Gehr, P. (2013) The bio-nano-interface in predicting nanoparticle fate and behaviour in living organisms: towards grouping and categorising nanomaterials and ensuring nanosafety by design. *BioNanoMaterials*, 14, pp.195–216. DOI: 10.1515/bnm-2013-0011

Comisión Europea, (2005) Nanociencias y nanotecnologías: Un plan de acción para Europa 2005-2009. COM (2005) 243

Comisión Europea, (2011) Recomendación de la Comisión de 18 de octubre de 2011 relativa a la definición de nanomaterial.

Comisión Europea, (2012) Segunda revisión de la normativa sobre los nanomateriales. COM (2012) 572 Committee to Develop a Research Strategy for Environmental, Health, and Safety Aspects of Engineered Nanomaterials; National Research Council, (2012). A research strategy for Environmental, Health and Safety Aspects of Engineered Nanomaterials. Washington (DC), National Academies Press (US)

Dawson, MA., Kouzarides, T. (2012) *Cancer epigenetics: from mechanism to therapy*. *Cell*, 6;150(1), 12-27. DOI: 10.1016/j.cell..06.013.

Dempsey, P. (1999). Utilizing Criteria for Assessing Multiple-Task Manual Materials Handling Jobs. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 24 (4), 405-416.

European Commission, (2009) Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU. COM (2009) 512/3

European Commission, DG for Research and Innovation, Industrial technologies, Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and New Production Technologies (NMP) (2013). *Nanotechnology a giant to trackle Europe's future challenges*.

European Agency for Safety and Health at Work, (2013). Priorities for occupational safety research in Europe: 2013-2020. Luxembourg, Publications Office of the European Union

EU-OSHA. (2013a). E-FACTS 72: Tools for the management of nanomaterials in the workplace and prevention measures.

EU-OSHA. (2013b). E-FACTS 73: Nanomaterials in the healthcare sector:

occupational risks and prevention

EU-OSHA. (2013c) E-FACTS 74: Nanomaterials in maintenance work: occupational risks and prevention

EU-OSHA. (2014a) Guidance on the protection of the health and safety of workers from the potential risks related to nanomaterials at work. Guidance for employers and health and safety practitioners

EU-OSHA. (2014b) Working Safely with Manufactured Nanomaterials. Guidance for Workers

Galera, A. (2014a), *Riesgo nano en la construcción: distintos oficios, distintas nanopartículas*.

Galera, A. (2014b), *¿Qué le dicen los expertos al Presidente Obama sobre nanotecnología y seguridad laboral?*

INRS. (2014) Aide aurepérage des nanomatériaux en entreprise, 2014

IRSST. (2014) Nanomatériaux Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieu de travail

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (2014). *Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas. Método Stoffenmanager nano 1.0*.

NIOSH. (2013) *Current Strategies for Engineering Controls in Nanomaterial Production and Downstream Handling Processes*

Ponce Del Castillo, M. A. (2013) *Nanomaterials and workplace health & safety. What are the issues for workers? ETUI*

Executive Office of the President. President's Council of Advisors on Science and Technology. (2012) Report to the President and Congress on the fourth assessment of the National Nanotechnology Initiative

Hansen, S.F., Maynard, A., Baun, A., Tickner, J.A. (2008) Late lessons from early warnings or nanotechnology, *Nature Nanotechnology*, (3/8) 444-447.

INRS (2014) Nanomatériaux – Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieu de travail, 2e édition, pag. 29

Kubota, T., Miyake, K., Hirasawa, T. (2012). Epigenetic understanding of gene-environment interactions in psychiatric disorders: a new concept of clinical genetics. *Clinical epigenetics*, 4:1

Migliore, L., Migheli, F., Spisni, R., Coppedè, F. (2011) Genetics, Cytogenetics, and Epigenetics of Colorectal Cancer. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, Article ID 792362, doi:10.1155/2011/792362

Monteiro-Riviere, NA., Inman, AO., Barlow, BM., Baynes, RE. (2006). Dermatotoxicity

of cutting fluid mixtures: In vitro and in vivo studies. *Cutaneous and Ocular Toxicology* 25, 235-247.

Nanosafety Cluster Review Meeting, Belgium (2014).

Nowack, B., Bucheli, TD., (2007) Occurrence, behavior effects of nanoparticles in the environment, *Environ Pollut Nov* 150(1):5-22

Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823–839. doi:10.1289/ehp.7339

Roco, M., Mirkin, C., Hersam, M., (eds) (2010) Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook. National Science Foundation/World Technology Evaluation Center report. Springer, Boston

Roco, M., (2011). The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticles Research* 13:427–445.

Rodriguez-Cortez, V.C., Hernando, H., de la Rica, L., Vento, R., and Ballestar, E. (2011) Epigenomic Dereglulation in the Immune System. *Epigenomics* 3, 697-713.

Savolainen, K., Backman, U., Brouwer, D., Fadeel, B., Fernandes, T., Kuhlbusch, T., Landsiedel, R., Lynch, I., Pylkkänen, L. (2013). Nanosafety in Europe 2015-2025: Towards Safe and Sustainable Nanomaterials and Nanotechnology Innovations. Helsinki, Finnish Institute of Occupational Health.

Sayes, C.M, Wahi R., Kurian P.A., Liu Y., West J,L., Ausman K.D., Warheit D.B., Colvin V.L. (2006) Correlating nanoscale titania structure with toxicity: a cytotoxicity and inflammatory response study with human dermal fibroblasts and human lung epithelial cells. *Toxicol Sci* 2006, 92:174-185

Shi, H., Magaye, R., Castranova, V., Zhao, J., (2013). *Titanium dioxide nanoparticles: A review of current toxicological data. Particle and Fibre Toxicology.* 10:15. doi:10.1186/1743-8977-10-15

Udali S, Guarini P, Moruzzi S, Choi SW, Friso S. (2012) Cardiovascular epigenetics: from DNA methylation to microRNAs. *Mol Aspects Med.* 34(4), 883-901.

van Broekhuizen, F.A., van Broekhuizen, J.C. (2009) Nanotechnology in the European Construction Industry State of the art 2009 EFBWW (European Federation of Building and Wood Workers) and the FIEC (European Construction Industry Federation), Amsterdam pag.11

Vogel, U., Savolainen, K., Wu, Q., van Tongeren, M., Brouwer, Berges, M. (eds) (2014) *Handook of Nanosafety. Measurement, Exposure and Toxicology.* San Diego, Academic Press.

Williams, R.S., Alivisatos, P. (eds.). (2000). *U.S. Workshop on Nanotechnology Research Direccions: IWGN Workshop Report.* Netherlands, Springer.

Zhao Y., Wang B., Feng W., Bai C. (2012). *Nanotoxicology: Toxicological and biological activities of nanomaterials*. In *Nanoscience and Nanotechnologies. Encyclopedia of Life Support Systems* (EOLSS) Publishers, Oxford, UK