



**Junta de
Castilla y León**

Consejería de Economía y Empleo
Dirección General de Trabajo
y Prevención de Riesgos Laborales

Implicación e Influencia de las Nanotecnologías y los Nanomateriales en Prevención de Riesgos Laborales

Rubén Sánchez Hidalgo

Centro de Seguridad y Salud Laboral de Castilla y León



**Junta de
Castilla y León**

Consejería de Economía y Empleo
Dirección General de Trabajo
y Prevención de Riesgos Laborales

Implicación e Influencia de las Nanotecnologías y los Nanomateriales en Prevención de Riesgos Laborales

Rubén Sánchez Hidalgo

Centro de Seguridad y Salud Laboral de Castilla y León

El siguiente estudio monográfico titulado **“Implicación e Influencia de las Nanotecnologías y los Nanomateriales en la Prevención de Riesgos Laborales”** ha sido elaborado por **Rubén Sánchez Hidalgo**.

Este estudio se enmarca dentro del Programa de becas para la realización de estudios monográficos sobre Seguridad y Salud Laboral en Castilla y León para Licenciados y Diplomados universitarios de la Consejería de Economía y Empleo de la Junta de Castilla y León.

Agradezco a la Consejería de Economía y Empleo de la Junta de Castilla y León la beca para el desarrollo del estudio monográfico que se desarrolla en esta memoria.

Así mismo, agradecer a José Miguel Alguero García, Jefe de la Sección de Unidades de Seguridad y Salud Laboral, del Centro de Seguridad y Salud Laboral de Castilla y León por la supervisión y participación en este estudio.

Por último, agradecer al personal del Centro de Seguridad y Salud Laboral de Castilla y León y a mis compañeros por su trato durante mi *estancia preventiva* en León.

Índice

Índice

Acrónimos	IX
Capítulo 1. Introducción y Objetivos	1
Capítulo 2. ¿Qué es la Nanotecnología?	7
2.1. Introducción a la Nanotecnología	11
2.2. Aplicaciones de la Nanotecnología	19
2.3. Financiación y Publicaciones en el ámbito de la Nanotecnología	22
Capítulo 3. Nanopartículas y Nanomateriales	27
3.1. Concepto y Clasificación	31
3.2. Síntesis de Nanopartículas	34
3.2.1. Método “Top-Down”	34
3.2.2. Método “Bottom-Up”	34
Síntesis en Fase Gaseosa	35
Métodos Químicos	35
3.3. Modificación Superficial de Nanopartículas	37
3.4. Ensamblaje de Nanopartículas	37
3.5. Algunas Nanopartículas y Nanomateriales de Interés	37
3.5.1. Nanomateriales basados en Carbono	38
Fullerenos	38
Nanotubos de Carbono	40
Grafeno	43
Negro de Carbón	46
3.5.2. Nanomateriales basados en Metales	48
Nanopartículas de Hierro	48

Nanopartículas de Plata	49
Nanopartículas de Oro	51
Quantum Dots (Puntos Cuánticos)	53
3.5.3. Nanomateriales basados en Óxidos Metálicos y no Metálicos	54
Nanopartículas de Óxido de Silicio	54
Nanopartículas de Óxido de Titanio (IV)	55
3.5.4. Dendrímeros	56
3.5.5. Nanocomposites	58
3.6. Aplicaciones	58
Capítulo 4. Riesgos en la Salud asociados a la Nanotecnología	61
4.1. Riesgos Asociados a la Nanotecnología	65
4.1.1. Factores que influyen en la Toxicidad de las Nanopartículas	67
4.1.2. Riesgo de Incendio y Explosión	69
4.1.3. Toxicidad	69
4.2. Métodos para la Evaluación de los Riesgos sobre la Salud	71
4.3. Propiedades Toxicológicas de los Nanomateriales	73
4.4. Evaluación de Riesgos por Exposición a Nanopartículas	75
4.5. Medidas de Prevención y Protección	84
Capítulo 5. Marco Normativo	89
5.1. Prevención de Riesgos Laborales. Historia.	93
5.2. Normativa referida a Nanotecnología y Nanomateriales	94
5.3. Organizaciones de Normalización	96
5.3.1. Organización Internacional, Europea y Nacional	96
5.3.2. Otras Organizaciones Internacionales	98

5.4. Comisiones Europeas dedicadas al campo de la Nanotecnología	100
5.4.1. Hacia una estrategia europea para las Nanotecnologías	101
5.4.2. Aspectos Reglamentarios de los Nanomateriales	102
Reglamento REACH	103
Directivas y Reglamentos para la protección de los trabajadores	104
Directivas y Reglamentos referidos a Productos	105
Directivas y Reglamentos para la protección del Medio Ambiente	105
Hacia una mejora en la Legislación y en su Aplicación	106
5.4.3. Revisiones de la Normativa	108
¿Cómo se definen los Nanomateriales?	108
Nanomateriales como vía de crecimiento económico, innovación y competitividad	109
Revisión de los Aspectos Relativos a la Seguridad	109
Ámbito Legislativo	110
5.5. Legislación Actual referida a la Salud, Seguridad y Aspectos Medioambientales aplicables a Nanomateriales. Nuevos Retos.	111
5.5.1. Productos de Cosmética	112
5.5.2. Aerosoles	113
5.5.3. Productos Medicinales	113
5.5.4. Amianto y Nanofibras de Carbono	114
5.5.5. Productos Alimenticios	115
5.6. Conclusiones	117

Capítulo 6. Conclusiones	119
Bibliografía	125
Anexos	135
Glosario	137
Folleto Divulgativo	143

Acrónimos

Acrónimos

AFM	Microscopía de Fuerza Atómica
CB	Control Banding
CNT	Nanotubos de Carbono
CVD	Deposición Química de Vapor
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EPI	Equipo de Protección Individual
FET	Transistores de Efecto de Campo
GO	Óxido de Grafito
HEPA	High Efficiency Particulate Air
IEC	Comisión Electrónica Internacional
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
LB	Langmuir-Blodgett
LDH	Lactato Deshidrogenasa
NC	Nanocomposite
NP	Nanopartícula
NTP	Nota Técnica de Prevención
OCDE	Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo Económico
PRL	Prevención de Riesgos Laborales
QDs	Quantum dots (Puntos Cuánticos)
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RGO	Óxido de Grafito Reducido
RMN	Resonancia Magnética Nuclear
ROS	Especies Reactivas de Oxígeno
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
STM	Microscopía de Efecto Túnel
VLA	Valores Límites Ambientales

Capítulo 1

Introducción y Objetivos



"Si no se conoce la causa de los fenómenos, las cosas se manifiestan secretas, oscuras y discutibles, pero todo se clarifica cuando las causas se hacen evidentes".

Louis Pasteur

1. Introducción y Objetivos

La nanotecnología se puede definir como la ciencia que abarca la observación, manipulación y obtención de materiales a escala nanométrica; es decir, con un tamaño del orden de una milmillonésima parte del metro. Los nanomateriales obtenidos con esta ciencia están cada vez más presentes en productos que se emplean cada día, desde cremas hidratantes, dispositivos electrónicos, prendas de vestir hasta en alimentos. Además, están en fase de investigación nuevas terapias prometedoras contra el cáncer de distinta naturaleza basadas en la nanotecnología.

Desde el proceso de investigación hasta la producción a gran escala, debe estar presente la *cultura de la prevención*. Es de vital importancia conocer los riesgos a los que están expuestos tanto los trabajadores implicados en la manipulación u obtención de nanomateriales como los consumidores. Lamentablemente, la investigación dedicada al conocimiento de los posibles riesgos que presentan la nanotecnología y los nanomateriales no ha crecido de manera paralela a la investigación de las propiedades de los nuevos nanomateriales. Esto es así, hasta tal punto que actualmente existen cientos de productos en el mercado que contienen nanomateriales y que, aunque cumplen con las normativas vigentes, no queda claro el posible riesgo a medio-largo plazo que puede presentar los nanomateriales que lo componen. El mayor problema reside en la falta de información toxicológica, es decir, no hay suficientes estudios que ilustren el riesgo para la salud al estar expuesto a determinados nanomateriales. Como consecuencia de este desconocimiento parece imposible consensuar normas que regulen la obtención, manipulación y uso de estos nanomateriales.

Por todo ello, los objetivos planteados en este estudio son, en primer lugar, explicar qué es la nanotecnología y cómo se obtienen algunos de los nanomateriales más investigados en la actualidad.

En segundo lugar, es fundamental conocer los posibles daños que pueden causar en la salud de los trabajadores y consumidores, por lo que se dedica un capítulo a los posibles riesgos emergentes que presentan las Nanotecnologías y los Métodos de Evaluación de Riesgos que pueden emplearse en la producción de nanomateriales.

Existen dos grandes problemas actualmente, en primer lugar, el desconocimiento generalizado de los daños que pueden causar a la salud humana y, en

segundo lugar y, como consecuencia del primero, la ausencia de una legislación clara y concisa que atañe a los nanomateriales, en todo su ciclo de vida, desde la investigación a los consumidores pasando por la producción industrial. Por ello, el último objetivo, es mostrar y comentar las diferentes normas y directivas que se siguen actualmente y que sirven de base para una legislación futura que abarque el uso de los nanomateriales.

Puesto que uno de los mayores problemas que existe en torno a la Nanotecnología es el desconocimiento de esta ciencia, se ha elaborado un folleto informativo sobre qué es la Nanotecnología y el papel de la Prevención de Riesgos Laborales en la consecución de un desarrollo tecnológico sin precedentes de manera segura.

Capítulo 2

¿Qué es la Nanotecnología?



“The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom. It is not an attempt to violate any laws; it is something, in principle, that can be done; but in practice, it has not been done because we are too big.”

Richard Feynman

2. ¿Qué es la Nanotecnología?

2.1. Introducción a la Nanotecnología

El 29 de Diciembre de 1959 el físico Richard Feynman pronunció una conferencia en el Instituto de Tecnología de California (EEUU) titulada “There’s Plenty of Room at the Bottom” (Hay mucho espacio en el fondo)¹ donde expuso que era posible manipular la materia a nivel atómico, lo que supondría un avance para solucionar los grandes problemas de la biología y la medicina en ese momento. En esta conferencia, Feynman comentaba las diferentes oportunidades que ofrecía una rama de la ciencia que, por aquel entonces, no era conocida por el nombre de Nanotecnología. *“¿Por qué no podemos escribir los 24 volúmenes de la enciclopedia Británica sobre la cabeza de un alfiler?”* Esta es una de las cuestiones que Feynman planteaba. *“La cabeza de un alfiler presenta un diámetro de unos 1.6 mm. Si este diámetro lo multiplicamos por 25000, el área que representaría sería equivalente a la superficie de todas las páginas de la Enciclopedia Británica ($\sim 1256.6 \text{ m}^2$). Sería entonces necesario reducir el tamaño de la Enciclopedia 25000 veces. ¿Es eso posible? La resolución del ojo es aproximadamente de 0.2 mm, que es aproximadamente el diámetro de los pequeños puntos que forman las reproducciones de la Enciclopedia. Si se reduce el tamaño 25000 veces, el diámetro de los puntos de las reproducciones sería de unos 80 Å ($80 \cdot 10^{-10} \text{ m}$), que equivale al diámetro de 32 átomos de un metal. Dicho de otro modo, cada uno de esos puntos que forman las letras podrían contener hasta 1000 átomos de un metal. Por tanto, sería fácil ajustar el tamaño de cada punto a nivel atómico mediante una técnica de fotograbado. De esta manera, no cabe duda de que hay espacio suficiente en la cabeza de un alfiler para poder escribir toda la Enciclopedia Británica”*

Este es sólo uno de los ejemplos que Feynman proponía en su discurso pero, ¿Cómo se podría llevar a cabo esas ideas? Hasta la fecha, no se habían desarrollado las técnicas instrumentales que permitirían, no sólo observar, sino manipular la materia a escala nanométrica. En sus elucubraciones sobre cómo llevar a cabo la escritura a nivel atómico describía la litografía de haz electrónico empleada en la fabricación de chips de silicio. *“¿No hay manera de hacer un microscopio electrónico más potente?”* Es una de las cuestiones que planteaba como auténticos retos de la comunidad científica para poder observar y manipular la materia a una escala que antes no se había planteado,

manipular la materia átomo a átomo. Esta conferencia impartida en el Instituto de Tecnología de California con motivo de la reunión anual de la Sociedad Física Americana significó el punto de partida de la Nanotecnología.

El término *Nanotecnología* es relativamente moderno. La primera vez que se empleó esta palabra fue en 1974 por parte del investigador japonés Norio Taniguchi de la Universidad de Ciencias de Tokio con la finalidad de describir los procesos de manipulación de la materia a nivel atómico y molecular en busca de una mejora en la ciencia de los materiales. Su definición consistía básicamente en procesos de deformación, consolidación y separación de materiales átomo a átomo y molécula a molécula². El prefijo nano en la palabra nanotecnología significa una milmillonésima ($1 \cdot 10^{-9}$); por lo tanto la Nanotecnología es la ciencia que estudia las estructuras de los materiales con dimensiones del orden de una milmillonésima parte del metro³.

A pesar de la corta edad de esta ciencia se conocen estructuras funcionales y dispositivos de dimensiones nanométricas desde hace siglos, algunos de ellos, incluso, han existido en la Tierra desde el origen de la vida. Desde un punto de vista biológico, se debe pensar en todos aquellos sistemas que de una manera u otra han sido capaces de desarrollar mecanismos de supervivencia basándose en el empleo de nanopartículas. Éste sería el caso de moluscos capaces de desarrollar conchas de carbonato cálcico nanoestructurado otorgándoles una mayor dureza y resistencia a la presión.

Otro ejemplo en el que los elementos nanoestructurados desempeñan un papel fundamental son las bacterias magnetotácticas que son capaces de utilizar el campo magnético de la Tierra para orientarse gracias a que contienen cadenas de partículas magnéticas de magnetitas (Fe_3O_4) denominadas *magnetosomas*. Debido a su capacidad de orientación son capaces de desplazarse hacia los nutrientes y en contra de lo que es letal para ellas, el oxígeno.

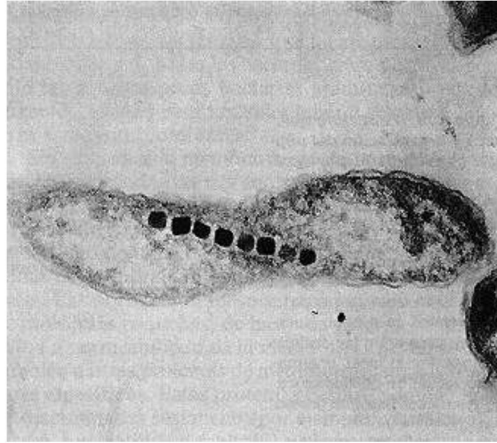


Figura 2. 1. Imagen de una bacteria magnetotáctica en la que se aprecian los magnetosomas alineados⁴.

Otro ejemplo sería el de las diatomeas. Estos organismos son una clase de algas unicelulares microscópicas. En ocasiones existen como colonias en forma de filamentos o cintas, abanicos o en zigzag. Este tipo de alga exhibe la característica de que presentan una pared celular nanoestructurada compuesta por sílice llamada *frústula*.

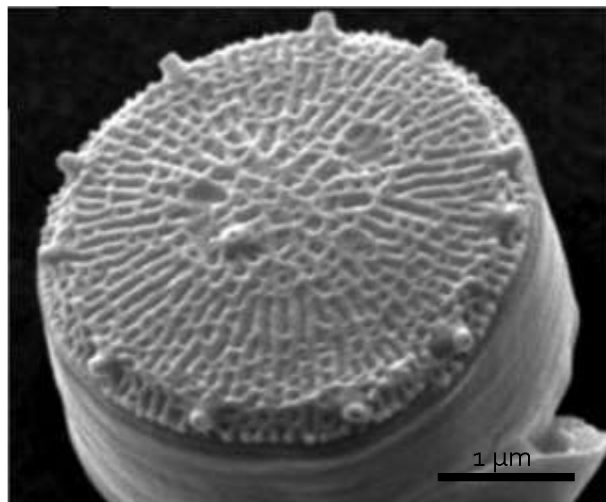


Figura 2. 2. Imagen de una diatomea marina (*Thalassiosira pseudonana*) obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) donde se observa la estructura de su pared celular⁵.

Éste y otros muchos ejemplos que podría citarse hace que los nanomateriales biológicos sean considerados como sistemas modelo para los nanomateriales útiles que pretenden tener aplicaciones tecnológicas.

Los seres humanos nos hemos beneficiado de las ventajas que presentan los nanomateriales antes incluso de poder observar la materia a escala nanométrica. Se sabe que los vidrieros romanos en el siglo IV (a.C.) fabricaban vidrios que contenían nanopartículas metálicas. Las vidrieras que adornan las catedrales medievales deben sus colores a la presencia de nanopartículas metálicas en el vidrio.

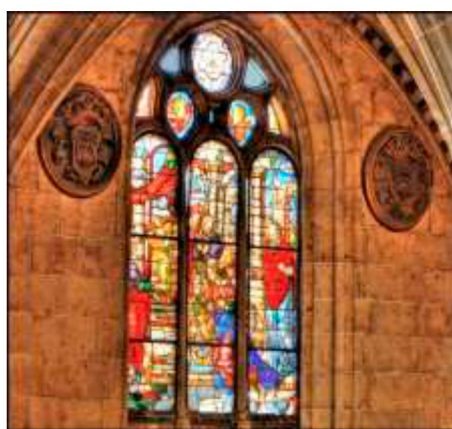


Figura 2. 3. Imagen de una Vidriera de la Catedral Nueva de Salamanca.

Otro ejemplo es el de la tecnología de la fotografía, cuyo desarrollo se produjo en los siglos XVIII y XIX, que se basa en la producción de nanopartículas de plata sensibles a la luz. Las películas fotográficas están formadas por emulsiones, finas capas de haluros de plata, y por una base de acetato de celulosa transparente. La luz descompone los haluros de plata produciendo nanopartículas de plata que forman la imagen.

Maxwell fue el primero en producir fotos en color en el año 1861. La fotografía en color que realizó Maxwell (Figura 2.4) se obtuvo a partir de tres fotografías sucesivas, cada una de ellas con un filtro diferente: rojo, verde y azul. Cada una de las tres imágenes se proyectaba sobre la misma pantalla con la luz del color del filtro que se había empleado para tomarla.

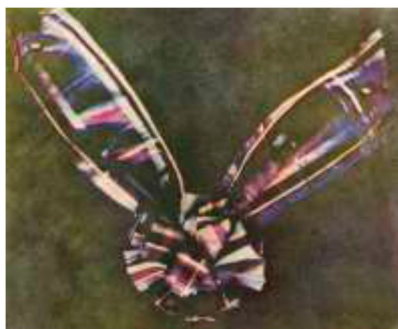


Figura 2. 4. Imagen de la primera fotografía tomada a color por Maxwell. En ella se representa una cinta de tartán característica de Escocia.

En 1857 Michael Faraday trató de explicar cómo influyen las nanopartículas metálicas en el color de las vidrieras pero no fue hasta 1908 cuando Gustav Mie determinó que el color de los vidrios dependía, no sólo del metal, sino del tamaño de las nanopartículas.

El trabajo científico de los nanomateriales se remonta al siglo XIX. En 1861 el químico británico Thomas Graham acuñó el término *coloide* para describir una solución que contenía partículas en suspensión de 1 a 100 nm. A comienzos del siglo XX, científicos tan reconocidos como Rayleigh, Maxwell y Einstein estudiaron estos sistemas coloidales. Años más tarde, en 1930, se desarrolló el método Langmuir-Blodgett para la preparación de monocapas adsorbidas sobre sólidos y, simultáneamente, se desarrollaron los hornos de arco y plasma empleados para producir partículas submicrónicas⁶.

Como se comentó al principio de este apartado, en el año 1959 Richard Feynman¹ ([PN 1965](#)) dictó una conferencia que fue entendida en su época como un discurso de ciencia ficción y en la actualidad como una profecía titulada “Hay bastante espacio en el fondo”. Su pensamiento no tuvo un gran recibimiento por parte de los científicos de su tiempo y no logró la repercusión que merecía hasta que se consiguieron los avances tecnológicos que permitieron vislumbrar el universo nanométrico que predecía.

Otros físicos teóricos como Ralph Landauer entre otros, tuvieron ideas sobre la electrónica a escala nanométrica y predijeron la importancia que los efectos cuánticos tendrían en tales dispositivos. A partir de los años 60 la fabricación de nanomateriales

creció exponencialmente, destacando los fluidos magnéticos (ferrofluidos) que estaban formados por nanopartículas magnéticas dispersadas en líquidos.

En los años 70 tanto en los laboratorios de Bell como en los de IBM se sintetizaron los primeros “pozos cuánticos bidimensionales”. Utilizando una técnica de crecimiento epitaxial lograron una fina película semiconductor construida átomo a átomo. Este trabajo supuso el inicio del desarrollo de los puntos cuánticos (quantum dots, QDs) que actualmente constituyen una rama de la nanotecnología con aplicaciones tecnológicas muy avanzadas^{7, 8}.

En la década de los 80 se produjo un gran avance en el campo de la nanotecnología debido al desarrollo de técnicas que permiten profundizar en la estructura de estos nanomateriales, entre ellas se puede citar la Microscopia de Efecto Túnel, STM, y la Microscopia de Fuerza Atómica, AFM; así como otros métodos para la obtención de nanoestructuras, como es el caso de la vaporización de metales utilizando un láser que permite obtener nanopartículas de diversos tamaños.

Binnig y Rohrer, trabajadores de la compañía IBM en Zurich, desarrollaron en 1971 el Microscopio de Barrido de Efecto Túnel. El *efecto túnel* es un proceso que es posible en la mecánica cuántica pero no en la mecánica clásica. La existencia del efecto túnel se comprobó de forma experimental en 1960 y puede explicarse de la siguiente forma; Si un electrodo es una punta metálica muy fina de unos pocos átomos de diámetro y el otro electrodo es la muestra a estudiar, cuando ambos se acercan a distancias muy pequeñas (0.2 a 1 nm) y se aplica una diferencia de potencial baja entre ambos electrodos, fluye una corriente entre ellos. Esta corriente dependerá fundamentalmente de la distancia entre ambos. Para obtener información de la superficie de la muestra se mueve la punta sobre esta o viceversa, de manera que se genera un barrido sistemático. Existen dos modos de trabajar con esta técnica: manteniendo la distancia constante entre la muestra y punta, midiendo la intensidad que fluye entre ellas; o bien mantener la intensidad constante entre muestra y punta. De estos dos modos se obtiene información sobre la superficie de la muestra, con una resolución vertical de 0.01 nm y lateral de 0.1 nm⁹.

La Microscopia de Fuerza Atómica, AFM, es, en la actualidad, una técnica muy empleada en el estudio morfológico de superficies de materiales y de manera muy específica en el estudio de la rugosidad de superficies de películas ultrafinas. El

microscopio AFM es un instrumento caracterizado por sus cualidades: el carácter no destructivo de la interacción con la muestra, la posibilidad de trabajar en condiciones normales, además de no presentar restricciones respecto al tamaño, forma y naturaleza conductora o aislante de las muestras. Está compuesto por un láser, un vástago (cantilever) con una punta (tip) y un fotodetector. El principio básico de AFM es la detección de interacciones de corto alcance (atractivas o repulsivas) entre la superficie de la muestra y la punta. Al desplazar la punta sobre la superficie se producen diferentes interacciones entre la muestra y la punta que provocan la deflexión del vástago. La desviación del vástago se mide por métodos ópticos mediante un haz de rayo láser que se refleja especularmente en la parte posterior del vástago e incide en un fotodetector, construyéndose así una imagen de la rugosidad de la superficie⁹.

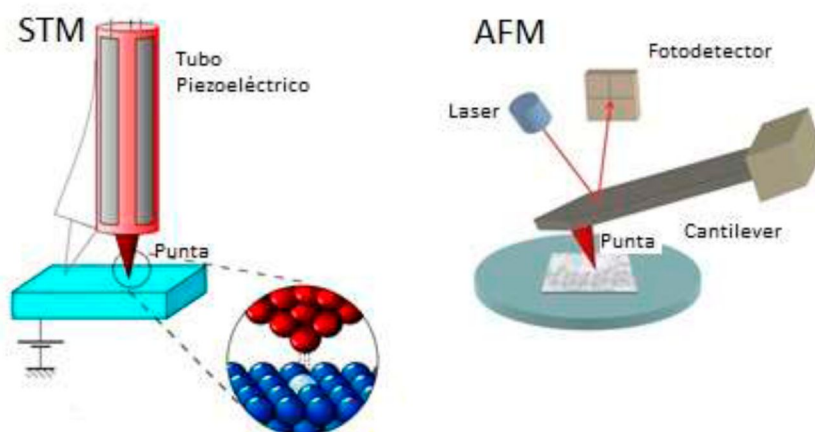


Figura 2. 5. Representación de los componentes más significativos de un Microscopio de Efecto Túnel ([STM](#)) y un Microscopio de Fuerza Atómica ([AFM](#)). Dos técnicas muy empleadas en la observación y manipulación de la materia a escala nanométrica.

A partir del desarrollo de las técnicas descritas anteriormente se desarrolló la investigación en síntesis de nanopartículas de diversa naturaleza. Dentro de las nanopartículas derivadas del carbón, que se comentarán con más detalle en los siguientes apartados, destaca los fullerenos, C₆₀ (~ 1 nm de diámetro) sintetizados por primera vez en el año 1985 por Smalley, Kroto y Curl¹⁰. El fullereno más conocido es el *buckminsterfullereno*, formado por 60 átomos de carbono, en el que ninguno de los pentágonos que lo componen comparten ningún lado. El nombre que recibieron es con motivo al parecido con una de las obras del arquitecto [Buckminster Fuller](#).

En el año 1987 se publicó la tesis de Eric Drexler bajo el título de “Los motores de la creación” (“Engines of Creation”), una publicación que popularizó la nanotecnología basada en las ideas genuinas de Feynman. En esta obra, [Drexler](#) argumenta las posibilidades que ofrece la nanotecnología y el impacto que tendrá en la vida cotidiana y en varias ramas de la ciencia. En la actualidad, Drexler continúa trabajando en sus ideas revolucionarias referidas a la Nanotecnología, sobre todo en la creación de nanobots (robots contruidos a escala molecular). “*La nanotecnología es la habilidad, cada vez más desarrollada, de fabricar materiales y productos con una precisión molecular. Cada átomo está situado específicamente, en una posición diseñada de antemano*” Esta es la definición actual que ofrece Drexler de la nanotecnología. Indica que es un terreno en constante desarrollo puesto que todos los campos de la ciencia (desde la exploración espacial hasta el diseño biomolecular) puede beneficiarse de ésta. Uno de los conceptos que trata en su libro es el de la *plaga gris*. Como no podía ser de otra manera, todas aquellas profecías que hacen referencia a un posible fin del mundo, fue uno de los conceptos que más popularizó su obra. Esta idea de plaga gris, contempla la posibilidad de la autorreplicación de los nanobots, lo que supondría una amenaza para los humanos que unido al consumo de los recursos naturales supondría la extinción de la especie humana. “*Los replicadores basados en el autoensamblaje podrían acabar incluso con organismos avanzados. Estos replicadores podrían diseminarse como polen y replicarse tan rápidamente que podrían reducir la biosfera a polvo en cuestión de días si no se toman las medidas necesarias para evitarlo*”¹¹.

A comienzos de los años noventa, se produjo una nueva revolución con la síntesis de los nanotubos de carbono (CNT) por Sumio Iijima¹². Esto supuso una revolución pues estos materiales, compuestos únicamente por carbono, se comportan como semiconductores, además de presentar superconductividad en determinadas condiciones. Además presentan extraordinarias propiedades mecánicas, ya que son 100 veces más resistentes que el acero y 6 veces menos pesado que éste. Durante una década el interés que presentaba este producto era meramente académico, sin embargo, actualmente se encuentra en desarrollo su aplicación en diferentes industrias como la espacial, automovilística y energética.

En la actualidad la Nanotecnología está presente en diversas ramas de la ciencia. Quizá sean la Ciencia de los Materiales y la Biomedicina las dos ramas donde se está

desarrollando con más potencia. En la Ciencia de los Materiales la Nanotecnología ha supuesto una revolución puesto que el comportamiento de los nanomateriales difiere completamente de los materiales macroscópicos, lo que ha permitido abrir una nueva rama de investigación centrada en la obtención y caracterización de materiales de diferente naturaleza, como se comentará en los próximos apartados.

En la actualidad la medicina presenta el mayor interés en la investigación en el mundo nanométrico, puesto que en él se encuentran posiblemente las alteraciones estructurales que provocan enfermedades, como el cáncer. La ingeniería genética surge como consecuencia de la evolución de las técnicas que han permitido el estudio del mundo nanométrico, permitiendo la manipulación genética, corrigiendo los defectos genéticos e incluso la creación de nuevas especies.

2.2. Aplicaciones de la Nanotecnología

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los nanomateriales difieren en aspectos fundamentales de las de los materiales macroscópicos. Por este motivo, se están investigando posibles aplicaciones en diferentes áreas como la información y la comunicación, ingeniería eléctrica, ingeniería industrial, ingeniería ambiental, química, medicina, productos farmacéuticos y cosméticos.

La nanotecnología engloba distintas áreas científicas y se ve favorecida por los avances en todas ellas, esperando dar respuesta a muchos de los problemas a los que se enfrenta la sociedad en la actualidad. A continuación se muestran algunas aplicaciones más prometedoras de la nanotecnología que se encuentran en fase de investigación¹³:

- Tecnología de la Información: En este sentido cabe destacar los sistemas de almacenamiento de datos de muy alta densidad de registro y las nuevas tecnologías de visualización a base de plásticos flexibles y materiales tan prometedores como el grafeno¹⁴.

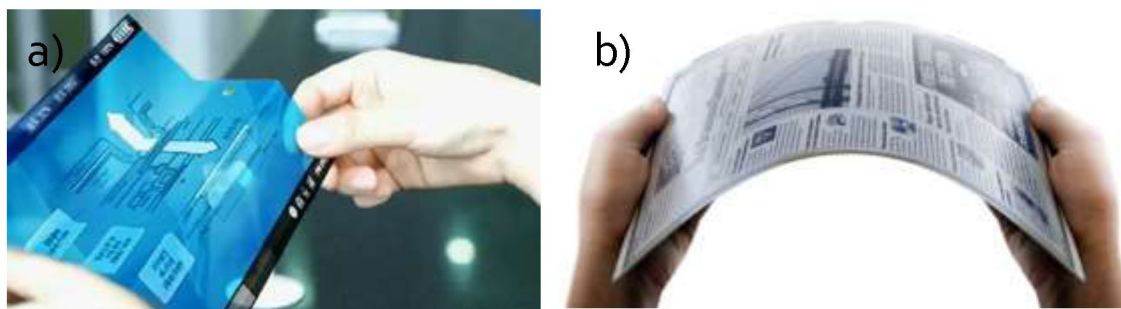


Figura 2. 6. Representación de nuevos dispositivos en fase de investigación como ordenadores flexibles (a) y e-paper (b)

- Medicina: En estas aplicaciones se incluyen los sistemas de diagnóstico miniaturizados que podrían implantarse y utilizarse en la detección precoz de enfermedades. Además, se encuentra en fase de desarrollo nuevos recubrimientos de implantes que mejoran la bioactividad y la biocompatibilidad. Se están desarrollando nuevos sistemas de administración de fármacos que permitirán la administración de una menor cantidad de principio activo pero dirigido al foco de la enfermedad, bacterias, virus o células cancerosas. Se investiga en la actualidad nuevas matrices soporte capaces de autoestructurarse para la formación de tejidos y órganos de sustitución.

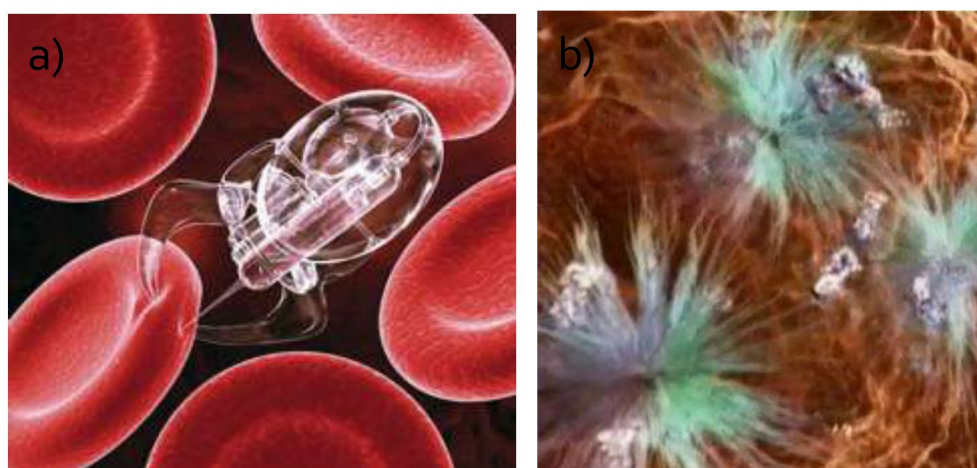


Figura 2. 7. Representación de las posibles aplicaciones de los nanobots (a) como nanomédicos y de dendrímeros (b) como liberadores de fármacos¹⁵.

- Almacenamiento de Energía: Desarrollo de nuevas pilas de combustible o sólidos ligeros nanoestructurados para un almacenamiento eficaz de hidrógeno. Son importantes las células fotovoltaicas que están en proceso de investigación que permitirían un ahorro energético y una mayor producción de energía a coste muy reducido.
- Ciencia de los Materiales: Los avances de la ciencia de los materiales mediante el empleo de la nanotecnología afectará a todos los sectores. Las nanopartículas ya se emplean para reforzar materiales o funcionalizar cosméticos. Para conseguir superficies resistentes al rallado, hidrófugas, limpias o estériles se recurre al uso de nanoestructuras superficiales. Materiales nanoestructurados permitirán la fabricación de biosensores y de dispositivos electrónicos moleculares. Así mismo, ofrecen una alternativa a los materiales actualmente empleados en aeronáutica pues son muchos más ligeros y resistentes.
- Agua, alimentos y medio ambiente: La investigación sobre los alimentos, agua y medioambiente pueden beneficiarse también de las nanotecnologías como por ejemplo el desarrollo de instrumentos capaces de detectar y neutralizar la presencia de microorganismos o plaguicidas. Técnicas fotocatalíticas pueden paliar el efecto de la contaminación y otros daños medioambientales como la contaminación de aguas o de suelo con petróleo y sus derivados. Quizá una de las aplicaciones más conocidas sea en la mejora de los materiales de envasado de alimentos. Consiste en el empleo de un nanomaterial que mejora las propiedades mecánicas, térmicas y también su acción como barrera de gases, formando un camino más difícil de atravesar por las moléculas gaseosas.

2.3. Financiación y publicaciones en el ámbito de la Nanotecnología

A la vista de las posibles aplicaciones de la Nanotecnología, muchos países están llevando a cabo programas de I+D cuyos fondos públicos han aumentado rápidamente. En el año 2004 la inversión pública mundial ascendía a unos 3000 millones de euros que, teniendo en cuenta la financiación privada, esta cifra aumentaría hasta los 5000 millones de euros.

En el informe de la Comisión Europea de ese año sobre Nanotecnología España aparece como el país europeo que menos ha invertido en nanotecnología, por debajo de países como Portugal y Grecia. Se destinaba el 1.03 % mientras que Europa en su conjunto destinaba el 1.99% de su PIB.

A la espera de los últimos datos económicos de inversión en nanotecnología, sí cabe destacar que en la comunidad europea se está llevando a cabo proyectos a nivel europeo para fomentar la I+D como la [FET Graphene Flagship](#) que supondrá una inversión de 1000 millones de euros durante la próxima década.

El incremento de la inversión mundial, tanto pública como privada, a lo largo de las dos últimas décadas se traduce en un mayor número de publicaciones. A continuación se muestran diferentes gráficos en los que se aprecia el aumento exponencial en el número de publicaciones en relación con diferentes palabras clave desde el año 1991 hasta la actualidad^a.

En primer lugar, se presenta un gráfico que muestra el número de publicaciones con la palabra clave nanotecnología. En todos los casos se han tenido en cuenta las publicaciones desde el año 1991 hasta la actualidad. En este primer caso, Figura 2.8, se observa un aumento exponencial del número de publicaciones. De igual modo, en las Figuras 2.9 y 2.10 se observa el mismo crecimiento exponencial que en el caso de la nanotecnología.

^a Los datos han sido obtenidos en [PubMed](#) para las palabras “Nanotechnology, Nanomaterials, Nanoparticles, Toxicity nano y Nanotechnology and Health & Safety at Work”

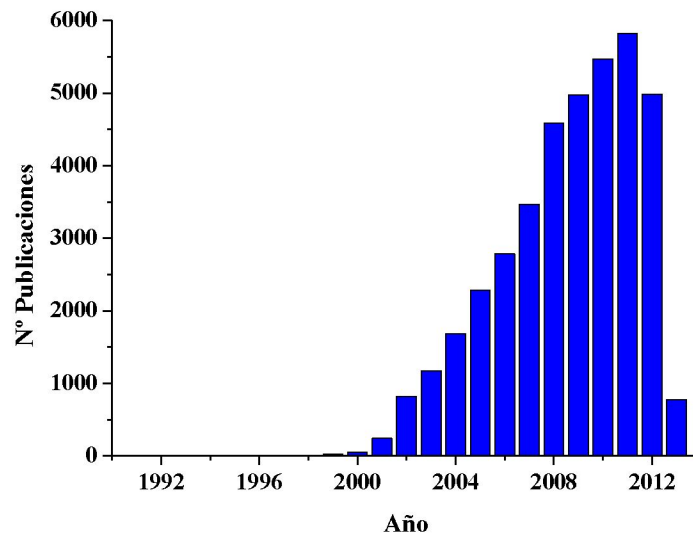


Figura 2. 8. Representación gráfica del número de publicaciones con la palabra clave Nanotecnología. (PubMed 28/02/2013)

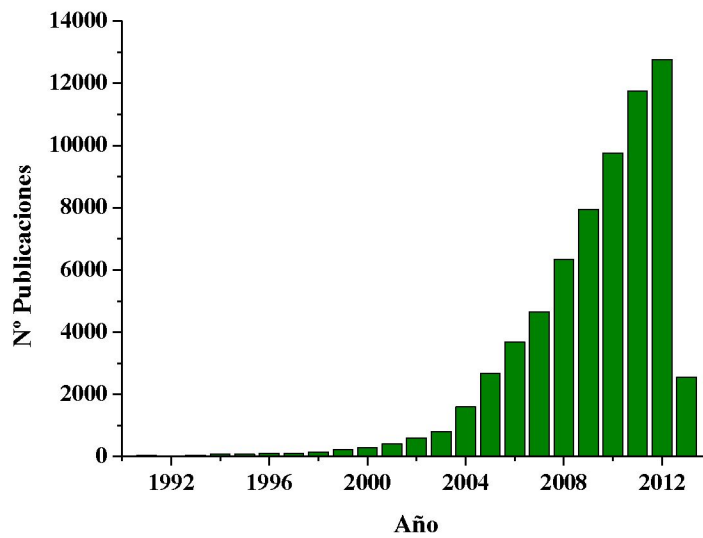


Figura 2. 9. Representación gráfica del número de publicaciones con la palabra clave Nanopartícula. (PubMed 28/02/2013)

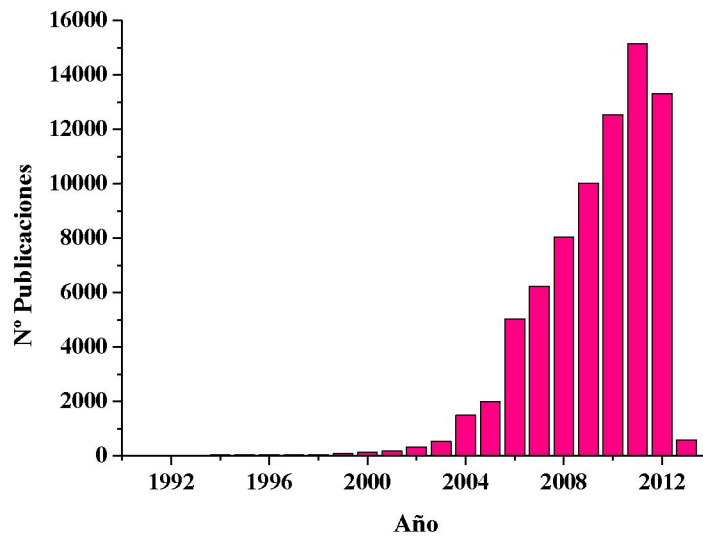


Figura 2. 10. Representación gráfica del número de publicaciones con la palabra clave Nanomaterial. (PubMed 28/02/2013)

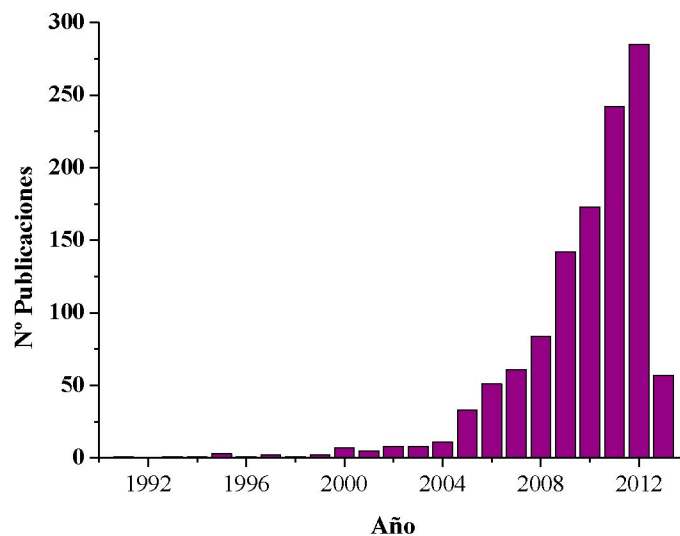


Figura 2. 11. Representación gráfica del número de publicaciones con las palabras clave Toxicidad y Nanotecnología. (PubMed 28/02/2013)

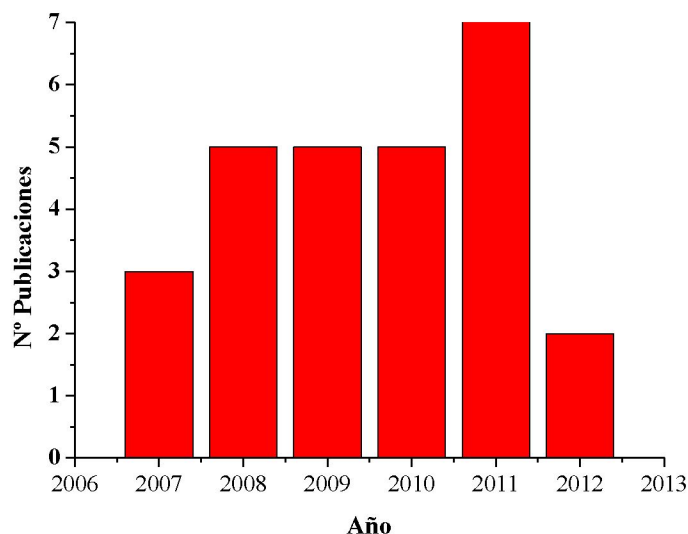


Figura 2. 12. Representación gráfica del número de publicaciones con las palabras clave Nanotecnología y Prevención de Riesgos Laborales. (PubMed 28/02/2013)

En el año 2012 las publicaciones relacionadas con estas palabras clave no alcanzaron las 32000 publicaciones, lo que supone aproximadamente un 5% menos respecto al año 2011. Es inevitable observar, que debido a la situación económica mundial actual, la inversión en el campo de la nanotecnología se ha visto reducida con respecto al año anterior, como se puede observar en la disminución de las publicaciones para el año 2012.

Es interesante observar el número de trabajos publicados en relación a la toxicidad y la nanotecnología. Cada vez son más los estudios centrados en los posibles efectos de nanopartículas y nanomateriales tanto en el medio ambiente como en la salud de los seres vivos.

Por último, cabe destacar el número de publicaciones relacionadas con la prevención de riesgos laborales en el campo de la nanotecnología, donde se observa que en los últimos años únicamente se publicaron 9 trabajos que evalúan los posibles efectos y peligros en el puesto de trabajo en la industria de la nanotecnología. Queda evidente que esta ciencia emergente que muestra un desarrollo sin precedentes no lleva

emparejada el desarrollo de una *cultura de prevención* específica para la exposición a entornos relacionados con la nanotecnología. Una de las causas de este hecho es el gran desconocimiento sobre la toxicidad que presentan los nanomateriales.

Capítulo 3

Nanopartículas y Nanomateriales



"La nanotecnología curará el cáncer, limpiará la polución y aliviará el hambre del mundo"

Eric Drexler

3. Nanopartículas y Nanomateriales.

A lo largo de este capítulo se explica qué se entiende por Nanopartícula además de comentar la obtención y clasificación de varias Nanopartículas de diferente naturaleza. Por último se comentan brevemente las aplicaciones de algunos nanomateriales en distintos ámbitos.

3.1. Concepto y Clasificación

El término Nanopartícula (de aquí en adelante NP) se emplea para describir partículas con un tamaño comprendido entre 1 y 100 nm, al menos en una de las tres dimensiones posibles⁶. En la Figura 3.1 se muestra los diferentes tamaños de estructuras biológicas

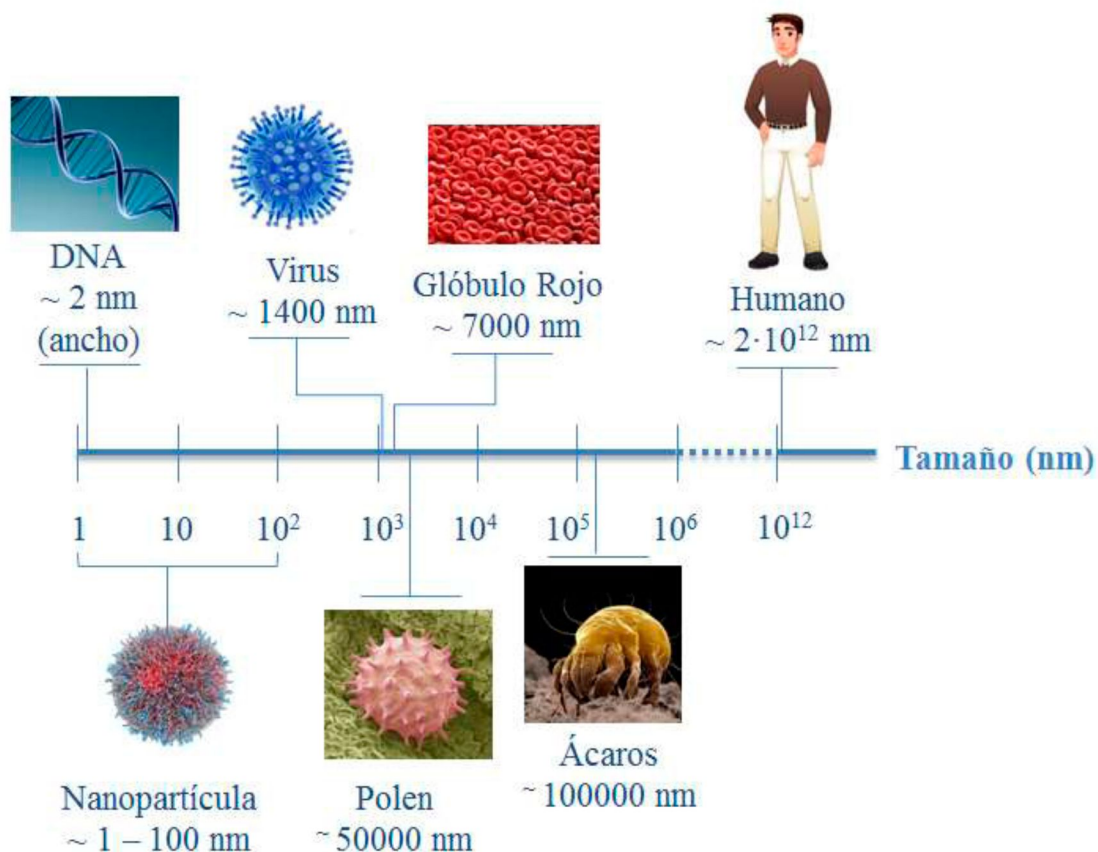


Figura 3. 1. Representación de los diferentes tamaños de estructuras biológicas. Aparecen representados el ancho del DNA, el tamaño de las NPs, Virus, Glóbulos Rojos, Polen, Ácaros y un Humano.

Estas NPs sirven como unidades básicas de construcción para diversas aplicaciones en la nanotecnología. En este margen de tamaño las propiedades físicas, químicas y biológicas de las NPs cambian en aspectos fundamentales con respecto a los materiales macroscópicos. Estos efectos se deben principalmente a dos motivos: en primer lugar, a la alta relación átomos / moléculas en la superficie de la NP en comparación con su interior y, en segundo lugar, a la gran área superficial por unidad de volumen. A continuación se ilustra el aumento de superficie específica que se produce al trabajar con NPs.

Supongamos una partícula hipotética, perfectamente esférica, de un radio de 1 mm. El área de esta partícula sería de 12.6 mm^2 , el volumen de 4.19 mm^3 . La relación entre el área y el volumen sería de 3.008.

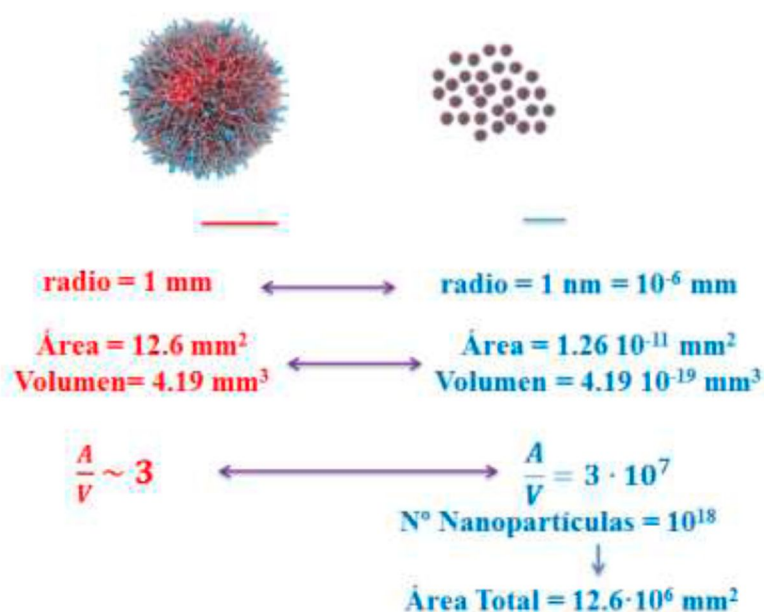


Figura 3. 2. Representación del Área y Volumen que representa una partícula macroscópica de 1 mm de radio comparado con los valores que se obtienen al dividir esa partícula en otras de radio nanométrico.

Imaginemos ahora que esa partícula se muele generando así otras partículas nanométricas con un radio hipotético de 1 nm ($= 10^{-6} \text{ mm}$). En este caso el área de cada NP sería de $12.6 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^2$, el volumen sería $4.19 \cdot 10^{-18} \text{ mm}^3$ y la relación entre área y volumen sería de $3 \cdot 10^7$. Además de presentar una relación área-volumen elevadísima, si

se considera el volumen de la partícula de 1mm de radio, al molerla y obtener NPs de 1 nm de radio, se obtendrían alrededor de 10^{18} NPs, por lo tanto el área total que representan las NP nanométricas es de $12.6 \cdot 10^6 \text{ mm}^2$.

Con este ejemplo se pretende poner de manifiesto la principal característica de las NPs que permite que estas presenten propiedades completamente diferentes comparando con los mismos materiales macroscópicos.

Por lo que se refiere a su obtención, la síntesis de estas NPs puede realizarse tanto en estado gaseoso como líquido y sólido. En la mayoría de los casos, y como se comentará más adelante, la superficie de las NPs debe ser modificada adecuadamente para pasivar o estabilizar el sistema. Esto se suele llevar a cabo modificando la reactividad química y las interacciones interpartículas. Por otra parte, es habitual modular las propiedades superficiales dependiendo de las aplicaciones en las que posteriormente van a ser utilizadas⁶.

Es difícil encontrar una única clasificación de las NPs ya que éstas se pueden clasificar atendiendo a un gran número de factores, entre los que caben destacar: su naturaleza química, la forma y la morfología, el medio donde se encuentran dispersas, el estado de dispersión y las modificaciones superficiales que puedan tener.

En función de la forma y dimensión del nano-objeto se diferencian los siguientes¹⁶:

- Nano-objeto (una o más dimensiones externas en la nanoescala)
 - NP (3 dimensiones externas en la nanoescala)
 - Nanofibra (2 dimensiones externas en la nanoescala)
 - Nanohilo (nanofibra eléctricamente conductora)
 - Nanotubo (nanofibra hueca)
 - Nanovarilla (nanofibra sólida)
 - Nanoplaca (1 dimensión externa en la nanoescala)

Esta clasificación está recogida en la norma UNE-CEN-ISO/TS 27687 elaborada por el comité AEN/CTN GET 15 *Nanotecnologías*, por la que se pretende crear una norma unitaria, en este caso sobre terminología y definiciones de términos que hacen referencia a la Nanotecnología.

Una clasificación muy empleada es aquella que hace referencia a su composición, donde se diferencian cuatro grandes grupos:

- **NPs de Carbono:** En este grupo se encontrarían todas aquellas basadas en el carbono como son: los fullerenos, nanotubos y grafeno. Este tipo de NPs presentan unas propiedades muy interesantes en cuanto a la conductividad eléctrica, la dureza y las propiedades térmicas.
- **NPs Metálicas:** En este gran grupo se englobarían las NPs de oro, plata, óxidos de titanio, y también los puntos cuánticos (sulfuro de cadmio y seleniuro de cadmio) cuyas propiedades varían en función de su tamaño.
- **Dendrimeros:** Estos compuestos son polímeros tridimensionales de forma arborescente. Poseen propiedades como una baja viscosidad intrínseca, alta solubilidad y baja temperatura de transición vítrea, que les hacen excelentes candidatos para fabricar catalizadores, termoplásticos y sensores.
- **Nanocomposites:** Son mezclas formadas por, al menos, dos componentes. Uno de ellos se denomina “*refuerzo*” y está formado por material nanométrico. El segundo componente se denomina de “*adhesión*” y tiene como finalidad mantener unido el material de refuerzo. En el proceso de mezclado se pretende producir un proceso sinérgico en el que se obtiene un material con mejores propiedades de las que presentan los materiales de partida.

3.2. Síntesis de NPs

Los métodos de síntesis de NPs se dividen en dos grandes bloques, denominados con la nomenclatura anglosajona como Top-Down (de arriba abajo) y Bottom-up (de abajo arriba).

3.2.1. Método “Top-Down”

Este método consiste en obtener las NPs a partir de un material macroscópico. Dentro de esta ruta englobaríamos métodos como la litografía, la molienda, y aquellos que emplean ácidos fuertes o ultrasonidos para fragmentar el material de partida y obtener partículas de tamaño nanométrico.

3.2.2. Método “Bottom-Up”

Este método consiste en ensamblar unidades pequeñas para obtener NPs de propiedades concretas. En relación a las técnicas Top-Down, estos métodos presentan una serie de ventajas entre las que se encuentran: Mayor control del tamaño de las NPs, menor grado de polidispersión del sistema, mayor control de los procesos de estabilización, ya que a menudo se utilizan sistemas autoensamblados cuyas propiedades pueden modularse con gran facilidad, mayor versatilidad para anclar moléculas que resulten útiles en las aplicaciones para las que están diseñadas.

A continuación se comentan algunas técnicas que se engloban en esta ruta de Bottom-Up.

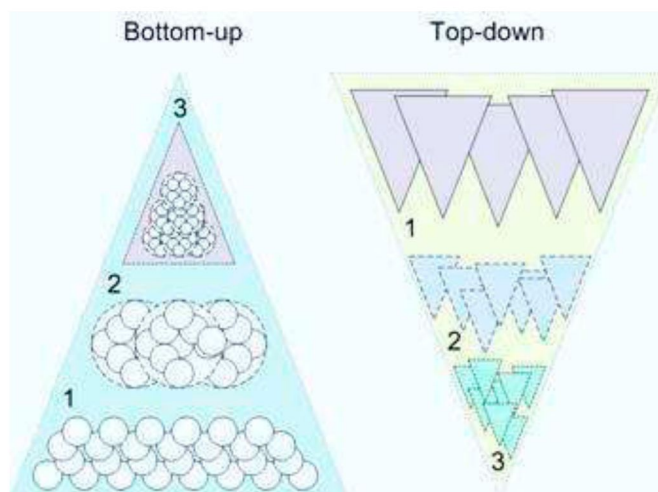


Figura 3. 3. Representación esquemática de las dos rutas que existen en la obtención de NPs.
Fuente: [IBM](#).

3.2.2.1. Síntesis en Fase Gaseosa

La síntesis en fase gaseosa se basa en la nucleación homogénea a partir de vapor supersobresaturado y el posterior crecimiento de la partícula. Los núcleos pueden ser amorfos o cristalinos, que permiten formar NPs amorfas o cristalinas. Las técnicas más empleadas se basan en el calentamiento y evaporación de un sólido junto con una corriente de gas. El vapor sobresaturado puede formar núcleos que crecen por colisión y condensación, dando lugar a partículas de distinta distribución de tamaños y morfologías. Dependiendo de los procesos de calentamiento y enfriamiento encontramos varias técnicas como la pirólisis en llama (TiO_2), reactores de flujo (Ag,

Ga, Al, PbS, Pb, Si, Ge), plasmas térmicos o de microondas (metales y óxidos metálicos), *sputtering* y ablación láser.

3.2.2.2. Métodos Químicos

Los métodos químicos empleados en la producción de NPs son similares a la síntesis en fase gaseosa. En este caso las moléculas precursoras se obtienen mediante reacción química. A continuación se comenta, con más detalle, algunos de estos métodos químicos:

Nucleación y crecimiento en disolución

Una técnica muy utilizada para la síntesis de partículas submicrónicas es la precipitación de un sólido en disolución. Este método implica un primer paso en el que se produce la molécula precursora, mediante una reacción química, seguido de un proceso de nucleación que comienza cuando se alcanza la sobresaturación. Para producir partículas monodispersas, los núcleos deben formarse al mismo tiempo y el posterior crecimiento debe ocurrir sin aglomeración de las partículas. Por tanto, es necesario un estricto control de la concentración de reactivos, temperatura, pH así como el orden en el que los reactivos se adicionan a la disolución.

Síntesis mediante Coloides de Asociación

Como se ha comentado al comienzo de este capítulo, las propiedades extraordinarias que presentan las NPs se deben a su pequeño tamaño, por lo tanto es necesario emplear métodos que controlen el tamaño de las NPs. Un método es emplear sistemas autoensamblados. Estos coloides sirven como nanoreactores que proporcionan un medio capaz de controlar la nucleación y crecimiento de la partícula, su tamaño y la homogeneidad química del material compuesto, además de actuar como barreras de aglomeración. Dentro de los coloides de asociación se pueden producir varios tipos de reacciones: precipitación, reducción e hidrólisis¹⁷.

Los sistemas que se emplean con este propósito incluyen micelas, microemulsiones, liposomas y vesículas. Estos coloides de asociación están formados por moléculas de tensioactivos. Un tensioactivo es una molécula que posee una estructura anfipática con el disolvente, diferenciando una cadena hidrocarbonada. Se clasifican de manera general según su naturaleza eléctrica en iónicos y no iónicos.

Síntesis Sol-Gel

Este método consiste en obtener una red integrada (gel) a partir de una disolución (sol), que actúa como precursor para obtener NPs de óxidos metálicos mayoritariamente. El estado de gel se puede alcanzar mediante la eliminación del disolvente o bien por el envejecimiento de la disolución. Este último método facilita las reacciones de hidrólisis y condensación quedando el disolvente embebido entre los polímeros de óxidos que se forman. Una vez obtenido el gel se produce el secado, y una posterior calcinación. Suelen emplearse sales precursoras en forma de alcóxidos. Este método cada vez más se emplea menos puesto que existen otros que proporciona una mejor obtención de NPs.

3.3. Modificación Superficial de NPs

En muchas ocasiones es necesario modificar superficialmente las NPs obtenidas con la finalidad de:

- Pasivar las NPs muy reactivas
- Estabilizar las NPs con tendencia a agregarse
- Funcionalizar las NPs con moléculas útiles a la aplicación para las que se han diseñado
- Favorecer el ensamblaje de las NPs

Las modificaciones más comunes suelen consistir en adsorber tensioactivos o ligandos cargados, polímeros, tanto sintéticos como naturales, antígenos, etc.

Debido a su pequeño tamaño y su gran área superficial, para minimizar la energía interfacial del sistema, las NPs tienen tendencia a formar aglomerados. Las aglomeraciones pueden ocurrir en cualquier etapa de la síntesis, o bien durante el proceso de secado o durante el posterior tratamiento a las que se les someta. Por lo tanto es muy importante estabilizar las partículas en cada una de las etapas de su producción.

3.4. Ensamblaje de NPs

Para las aplicaciones que se pretenden dar a las NPs es necesario unir las entre sí manteniendo una estructura determinada. En estos casos se utilizan moléculas de polímero o agregados coloidales que se utilizan como una plantilla capaz de dirigir la estructura final del agregado. Por ejemplo para autoensamblar NPs de oro se emplean polielectrolitos catiónicos mientras que para ensamblar las NPs de sílice se emplean

polielectrolitos aniónicos. También se ha empleado un método basado en las interacciones antígeno-anticuerpo para dirigir el ensamblaje de NPs.

3.5. Algunas NPs y Nanomateriales de Interés

En los siguientes apartados de este capítulo se comentan con más detalle algunos tipos de NPs que por sus características y potencial poseen numerosas aplicaciones en la industria.

3.5.1. Nanomateriales basados en Carbono

Fullerenos

Harry [Kroto](#) investigaba junto a Richard Smalley y Robert Curl las posibles reacciones en una estrella gigante roja con atmósfera rica en carbono, en concreto buscaba la formación de largas cadenas de carbono. En su investigación encontraron que efectivamente tales compuestos podían formarse pero además observaron la aparición de moléculas formadas por carbono, entre 38 y 120 átomos por molécula (siempre número par). Dependiendo de las condiciones de reacción predominaba un tipo de molécula u otra, siendo mayoritaria la que contenía 60 átomos de carbono. Esta molécula fue considerada por la revista [Science](#) molécula del año. Su descubrimiento y posterior estudio les valió a sus descubridores el Premio Nobel de Química en el año 1996¹⁰.

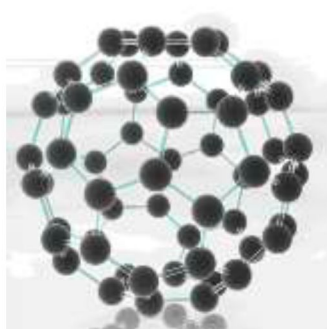


Figura 3. 4. Imagen de un fullereno conocido también como buckminsterfullereno formado por sesenta átomos de carbono, C₆₀.

El fullereno más conocido es el buckminsterfullereno, formado por 60 átomos de carbono (C₆₀), en el que ninguno de los pentágonos comparten lados. Como se comentó con anterioridad, el nombre de buckminsterfullereno proviene del arquitecto

Richard Buckminster Fuller debido al parecido entre la estructura de este tipo de NP y una de las construcciones del mencionado arquitecto. Con posterioridad se han descubierto y caracterizado otros fullerenos formados por menor o mayor número de átomos (desde 20 hasta cientos), aunque son más difíciles de obtener que el C60.

Estructura y propiedades

Son estructuras huecas cerradas formadas por átomos de carbono dispuestos en forma de pentágonos y hexágonos a modo de “nanobalones” de fútbol. Cada átomo de carbono está enlazado a otros tres, es decir, posee un estado de hibridación sp^2 , y toda la molécula es aromática. Como consecuencia de su estructura existe una tensión, pero la elevada simetría la distribuye por igual sobre toda la estructura. Dicha tensión se reduce cuanto más grande es el fullereno.

Entre sus propiedades físicas destaca la de que son capaces de resistir presiones extremas (hasta 3000 atmósferas de presión) y recuperar su forma original cuando cesa la presión. En muchas ocasiones se adiciona fullerenos a polímeros para aumentar su resistencia.

Los fullerenos (con un diámetro de 1 nm) se asocian espontáneamente formando agregados de varias moléculas que alcanzan tamaños desde 10 nm hasta varias micras. Debido a las uniones intermoleculares débiles mediante fuerzas de Van der Waals, los agregados de fullerenos poseen propiedades lubricantes.

Obtención de Fullerenos

Existen diversos métodos de obtención, sino uno de los más conocidos el empleado por el grupo Smalley-Kroto y Curl, en el que empleaban un láser para vaporizar grafito. Los fullerenos se forman cuando el carbón vaporizado se deposita y condensa en una atmósfera inerte de Helio¹⁰.

Otros métodos alternativos incluyen la pirólisis de diversos compuestos aromáticos, el uso de una llama de benceno, o la evaporación con un haz de electrones o por pulverización catódica^{18, 19}.

Posibles Riesgos

Investigadores estadounidenses han probado que los fullerenos pueden producir un impacto fisiológico en organismos acuáticos. La investigadora Eva Oberdörster

muestra una significativa evidencia de estrés oxidativo en cerebro y branquias de lubina negra al estar expuesto durante 48 horas a agua contaminada con fullerenos con unas concentraciones similares a las que pueden encontrarse en el medio ambiente.

Estudios previos han demostrado que ciertas NPs tienden a atravesar la pared celular y llegar a las mitocondrias; Oberdörster sostiene la hipótesis de que los fullerenos pueden seguir un camino similar al ser muy reactivo con el oxígeno y ser atraídos por los lípidos, lo que causaría daño oxidativo en el cerebro de los peces²⁰.

Nanotubos de Carbono

Los nanotubos de carbono son una forma alotrópica del carbono, al igual que el diamante, el grafito y los fullerenos. Su estructura puede considerarse procedente de una lámina de grafito, de grafeno o los fullerenos. Dependiendo del grado de enrollamiento, de la manera que se conforma la lámina original puede dar lugar a nanotubos de distinto diámetro y geometría interna. La primera imagen obtenida por microscopía electrónica de transmisión (TEM)²¹ de nanotubos de carbono en el año 1952 por L.V. Radushkevich y V.M. Lukyanovich pero no es hasta el año 1991 cuando Sumio Iijima sintetiza por primera vez este material¹².

Existen nanotubos monocapa (una única capa) denominados en inglés single wall nanotubes (SWNTS), y nanotubos multicapa (varios tubos concéntricos) denominados multiple wall nanotubes (MWNT).

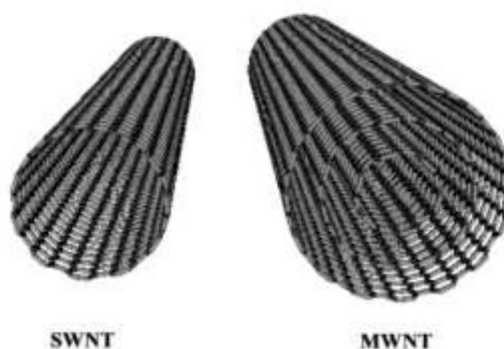


Figura 3. 5. Representación de un nanotubo de carbono monocapa (SWNT) y de un nanotubo de carbono multicapa (MWNT).

Obtención de Nanotubos de Carbono

En la síntesis de nanotubos de carbono existen tres técnicas muy empleadas en la actualidad que son: la descarga por arco, la deposición química de vapor (CVD) y la ablación por láser. Estos tres métodos tienen en común el aporte energético a la fuente de carbono, ya sea en forma de electricidad (arco eléctrico)²², calor (deposición química de vapor)²³ o luz ultraintensa (ablación por láser)²⁴. En estos tres casos se producen fragmentos, en muchas ocasiones de unos pocos átomos de carbono que se recombinan para formar los nanotubos.

El método de arco eléctrico se empleó inicialmente en la producción de fullerenos C₆₀ puesto que es un método relativamente sencillo. En la actualidad cada vez se emplea menos en la producción de nanotubos de carbono frente a otras técnicas como la ablación láser, puesto que presenta algunos inconvenientes como producir mezclar de componentes entre los nanotubos y los metales catalíticos empleados en la producción. Una ventaja que presenta es la generación de grandes cantidades de nanotubos con características similares a los obtenidos por ablación láser.

La obtención de nanotubos de carbono por el método de ablación láser²⁵ fue empleado por primera vez por el grupo de Smalley de la Universidad de Rice en el año 1995. Consiste en bombardear con un haz láser una muestra de grafito en un horno a 1200 °C en presencia de un gas inerte a una presión de unos 500 torr. Los átomos y moléculas de carbono vaporizados condensan formando nanotubos de carbono de pared simple, pero no en tanta cantidad como en descarga por arco.

Por último, otro método muy empleado es la deposición química de vapor (CVD), que implica la interacción entre una mezcla de gases (metano, dióxido de carbono o acetileno) y la superficie de un sustrato calentado, provocando la descomposición química del gas y la formación del producto sobre el sustrato²⁶. Junto con el sustrato suele estar recubierto por una película de catalizador de Ni, Fe o Co. La elección del catalizador, así como las condiciones de temperatura y presión, determinan el diámetro y la tasa de crecimiento de los nanotubos.

Propiedades

El diámetro de los nanotubos es del orden de unos nanómetros, mientras que su longitud puede alcanzar el milímetro. Presentan, por tanto, una elevada relación

longitud/radio. Por este motivo se puede considerar que los nanotubos de carbono son monodimensionales.

Los nanotubos se caracterizan por presentar una gran complejidad electrónica debido a que está compuesto por carbonos sp^2 . Además, la estabilidad y robustez de los enlaces entre los átomos que los forman le proporcionan una gran resistencia, puesto que son 100 veces más resistentes que el acero y 6 veces más ligeros. Es importante indicar que los nanotubos de carbonoso son capaces de deformarse hasta un 15% antes de fracturarse. La dureza de algunos nanotubos es incluso superior a la del diamante.

La conductividad térmica de los nanotubos de carbono de pared simple es muy superior a la de los materiales como el cobre (Cu), plata (Ag) o incluso el diamante (hasta el doble).

Estas propiedades hacen que los nanotubos puedan ser empleados en diversas aplicaciones, la gran mayoría de ellas en fase de investigación.

Aplicaciones

La gran superficie específica que presenta junto con su estructura cilíndrica permite su idoneidad para el empleo de este material en distintos campos como el automovilístico, almacenamiento de energía, industria aeroespacial, textil y electrónica.

En muchas ocasiones no se emplean los nanotubos de carbono solos sino que se emplean mezclados con otros materiales como son los polímeros. De esta forma se consiguen matrices poliméricas conductoras y con propiedades mecánicas reforzadas. Esta mezcla hace posible poder aplicar los nanotubos en diversas aplicaciones industriales. Una aplicación que está en pleno crecimiento es su aplicación en la industria automovilística y aeroespacial²⁷.

Como otras NPs los NTC presentan una elevada superficie específica, de tal forma que puede ser empleado como material absorbente en la eliminación, por ejemplo, de sustancias tóxicas en agua²⁸.

En el campo de la medicina los nanotubos de carbono ofrecen un avanza en tratamientos médicos como por ejemplo: mejora en la implantación de marcapasos, implante de biosensores en el organismo, mejoras en la audición y liberación de fármacos a nivel celular²⁹.

Como consecuencia de sus propiedades eléctricas tan excepcionales se estudia su empleo en nanocables y nanocircuitos en transistores electrónicos de escala nanométrica.

Posibles riesgos

Estudios recientes muestran que la inhalación de NTC puede causar inflamación pulmonar y fibrosis. El tipo de NTC, así como morfología y posibles modificaciones superficiales pueden influir en la gravedad de la afección. Sin embargo, actualmente no existe información suficiente como para identificar cuáles son los factores de riesgo de mayor relevancia.

Una publicación reciente pone de manifiesto el daño provocado por NTC y otros tipos de NPs derivadas de carbono, en células neuronales³⁰. Como consecuencia de su tamaño, las NPs atraviesan la pared celular contaminando las células. Los niveles de LDH (Lactato Deshidrogenasa) que es una enzima presente en tejidos de diferente naturaleza, indican el daño que ha sufrido la pared celular, cuanto más elevado sea este nivel mayor daño se habrá producido. En cambio, el nivel de proteínas indica el grado de muerte celular como consecuencia de la exposición a NTC. Cuando las células están contaminadas se desencadena un proceso conocido como apoptosis que hace posible la destrucción de las células dañadas evitando así la aparición de enfermedades como el cáncer. El problema es que estos nanomateriales son difíciles de destruir, y una vez muere una célula éstos pasan de nuevo a nuevas células contaminándolas y desencadenando otro proceso de muerte celular.

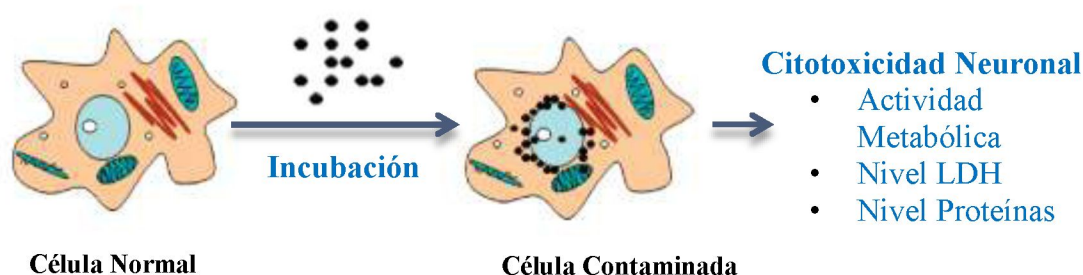


Figura 3. 6. Representación esquemática de las condiciones experimentales bajo las que se ha llevado el estudio de la toxicidad de NTC en células neuronales³⁰.

Grafeno

El grafeno es una lámina monoatómica bidimensional de átomos de carbono dispuestos en una estructura hexagonal que posee extraordinarias propiedades entre las que cabe destacar sus propiedades eléctricas (presenta una conductividad eléctrica 100 veces superior a la del cobre)³¹, propiedades ópticas (es capaz de transmitir un 97.4 % de la luz) su elevada conductividad térmica (1.5 veces la del diamante)³², su elevada dureza (200 veces la del acero)³³, así como una gran elevada superficie específica ($2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)³⁴.

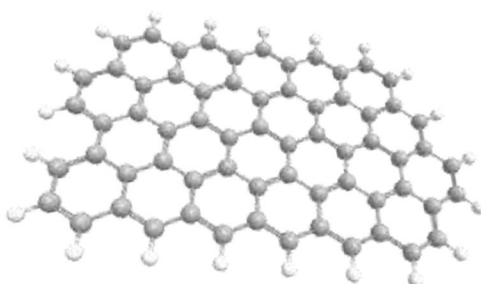


Figura 3. 7. Representación de una lámina de grafeno constituida por átomos de carbono dispuesto en estructura hexagonal.

Obtención

Existen diversos métodos de obtención de grafeno, pudiendo agruparlos en dos grandes grupos: métodos físicos y métodos químicos.

Dentro de los métodos físicos se encuentra la exfoliación mecánica, que es el método que emplearon los científicos A. Geim y K. Novoselov para obtener láminas monoatómicas de grafeno³⁵. En esta técnica emplearon una cinta adhesiva para exfoliar sucesivamente las diferentes capas del grafito. Además, fueron capaces de depositar una lámina sobre un sustrato sólido presionando la cinta adhesiva sobre un sustrato de silicio. Con este método consiguieron obtener láminas de un área no superior a $100 \mu\text{m}^2$. La principal ventaja de este método es que se obtienen láminas sin apenas defectos estructurales; sin embargo presenta el inconveniente de que no es un método lógico para la producción a gran escala.

De igual manera destaca entre los métodos físicos la deposición química de vapor (CVD) con la que se ha conseguido obtener láminas de grafeno de hasta 30 pulgadas de tamaño para poder aplicarlo en la fabricación de pantallas táctiles¹⁴. El principal inconveniente de esta técnica es su coste y la contaminación que supone. Además no se obtiene únicamente monocapas atómicas sino que se consiguen espesores en torno a 2 - 5 capas.

Una alternativa, para solventar los principales problemas de los métodos físicos, la constituye el método químico. Este método consiste en una exfoliación química mediante una reacción de oxidación³⁶ de escamas de grafito para obtener un producto soluble en agua denominado óxido de grafito, GO. A continuación se lleva a cabo una reducción química para eliminar los grupos oxigenados y obtener grafeno químico, RGO. En la actualidad se estudia el impacto de tensioactivos³⁷ y polímeros³⁸ en el medio de reacción como exfoliantes de las láminas de GO para obtener las monocapas que presentan las propiedades buscadas.

Propiedades y aplicaciones

Como se comentó anteriormente, el grafeno posee unas propiedades extraordinarias. Una de estas propiedades es que este nanomaterial compuesto únicamente por átomos de carbono es transparente, permite el paso del 97% de la luz incidente en un margen muy amplio de longitudes de onda. Además, como ya se comentó presenta una conductividad muy elevada, hasta 100 veces superior a la del cobre. La combinación de las propiedades eléctricas junto con las ópticas hace del grafeno un material de gran interés para la fabricación de dispositivos fotoelectrónicos ultrarrápidos, sensores de nueva generación y en la fabricación de células fotovoltaicas¹⁴.

Puesto que una de las principales aplicaciones del grafeno es como componente en la fabricación de dispositivos electrónicos, es necesario conocer sus propiedades térmicas, ya que el calor que se genera durante el funcionamiento de éstos ha de ser disipado. Los estudios de caracterización han llevado a observar una conductividad térmica 1.5 veces superior a la del diamante, lo que permitirá emplear el grafeno en dispositivos electrónicos con un buen rendimiento.

Por último, las características mecánicas del grafeno merecen una gran atención. Quizá la propiedad mecánica más importante sea su dureza, 200 veces superior a la del

acero. El valor obtenido de la constante elástica indica que el grafeno se puede deformar hasta un 10% de una manera reversible, lo que supone 3 veces más comparado con otros materiales sólidos. Estas propiedades mecánicas unidas a su baja densidad hacen del grafeno un material idóneo para su empleo en la industria aeroespacial y automovilística, puesto que permitirá la construcción de aeronaves mucho más ligeras y más resistentes que las que existen en la actualidad.

Posibles Riesgos

Los objetivos principales en el campo de la nanotoxicología es comprender y evaluar la exposición a las NPs, su papel biológico y ambiental, el transporte, la transformación que pueden sufrir, el reciclado y la estabilidad general³⁹.

El óxido de grafito y grafeno son en la actualidad dos nanomateriales más estudiados debido a las extraordinarias propiedades y sus posibles aplicaciones en la fabricación de dispositivos electroquímicos, almacenamiento de energía, propiedades catalíticas, adsorción de enzimas además de sensores químicos y biosensores. Sin embargo, la información acerca del impacto ambiental y riesgo en la salud a largo plazo es muy escasa.

Investigaciones recientes han demostrado que las nanoplaquetas de óxido de grafito (GO), presentan una actividad bactericida. En estos estudios se observó un decrecimiento entre un 60% y 70% de la viabilidad celular de dos tipos de bacteria: *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*³⁹.

La actividad metabólica de la *E. coli* se reduce hasta un 13% al incubarse en una disolución de GO de una concentración de 85 µg/l. Se ha demostrado por SEM que lo que se produce es una destrucción de la pared celular. Por lo tanto se concluye que la toxicidad del GO se atribuye al daño mecánico de la membrana celular provocado mayoritariamente por los bordes de las nanoplaquetas. La concentración y el tamaño de las nanoplaquetas parecen determinantes en la toxicidad, así como se demuestra en estudios recientes⁴⁰⁻⁴³.

Todos estos estudios que se están llevando a cabo sobre la citotoxicidad de grafeno, óxido de grafito y óxido de grafito reducido, limita sus potenciales aplicaciones médicas. Por lo tanto, se deben llevar a cabo estudios toxicológicos exhaustivos de

grafeno funcionalizado y sin funcionalizar en diferentes modelos animales para decidir sobre sus potenciales aplicaciones biomédicas.

Negro de Carbón

Obtención y Propiedades

El negro de carbón es un material que se obtiene mediante la combustión incompleta de productos derivados del petróleo. Se trata de una forma de carbono con un tamaño de partícula comprendido entre 1 y 100 nm (existen también partículas de hasta 500 nm) y con una relación superficie-volumen muy elevada, por lo que constituye uno de los nanomateriales más empleado en la actualidad. Aproximadamente un 85% de la producción mundial de nanomateriales corresponde a negro de carbón.



Figura 3. 8. Imagen de agregados de Negro de Carbón que se emplea para mayoritariamente como pigmento y como material de refuerzo en neumáticos.

Aplicaciones

La aplicación más común del negro de carbón es como un pigmento y como material de refuerzo en neumáticos. Este material ayuda a disipar el calor reduciendo el daño térmico e incrementando la vida de la goma. Además, algunas variantes del negro de carbón se emplean en tóner.

Posibles Riesgos

El negro de carbón es un material que se lleva empleando desde hace siglos, por lo que, a diferencia de otras NPs basadas en carbono que se han comentado hasta ahora, existen diversos estudios sobre su peligrosidad.

Los principales peligros que presentan son el de incendio (las nubes de polvo pueden arder en contacto con superficies calientes por encima de 500°C) y el de explosión (Las partículas dispersas forman mezclas explosivas en el aire).

La sustancia es un agente reductor fuerte y reacciona violentamente con oxidantes, por lo que reacciona bruscamente con diversos compuestos. El valor límite ambiental de exposición diaria (VLA-ED) que está fijado es de 3.5 mg/m³, lo que es una cantidad muy reducida en este caso en el que se trabajaba en grandes cantidades. Los datos expuestos en la Ficha Internacional de Seguridad Química están desarrollados para polvos micrométricos, pero hacen referencia indicando que para partículas ultrafinas (< 100 nm) pueden producir efectos adversos a concentraciones inferiores a las indicadas.

Los efectos que se han observado cuando se está expuesto durante un periodo de tiempo corto es irritación mecánica mientras que para una exposición prolongada se observa daño en los pulmones. En base a los últimos resultados experimentales obtenidos, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifican al negro de carbón como un posible carcinógeno para los humanos⁴⁴.

Para evitar los peligros que se han descrito se recomienda lo siguiente:

- Evitar llamas. No poner en contacto con superficies calientes
- Evitar la creación de nubes de polvo.
- Equipo eléctrico y alumbrado a prueba de explosión de polvo

Para evitar el contacto por las diferentes vías de exposición se recomienda:

- Sistemas cerrados (evita inhalación)
- Guantes de protección
- Gafas ajustadas de seguridad
- No comer, ni beber, ni fumar
- Lavarse las manos antes de comer

3.5.2. Nanomateriales basados en Metales

NPs derivadas de Hierro

Las NPs de hierro y sus óxidos presentan propiedades magnéticas muy interesantes. Algunas de estas NPs exhiben una forma única de magnetismo denominado superparamagnetismo para un tamaño comprendido entre 10 – 20 nm.

Propiedades y Aplicaciones

El principal problema de las NPs de hierro (Fe^0) es crear dispersiones estables en un proceso directo puesto que estas tienden a oxidarse en aire para formar óxidos de hierro. El proceso de oxidación conlleva una reducción del momento magnético de las NPs y la formación de agregados, perdiendo sus propiedades magnéticas características. Investigadores de la universidad de Brown, EE.UU, han demostrado que existen mecanismos para llevar a cabo una oxidación controlada que permite obtener dispersiones estables en atmósfera oxidante⁴⁵. El hierro cerovalente especialmente en nanoescala presenta una gran reactividad⁴⁶⁻⁴⁸. Una de las aplicaciones que se ha experimentado una gran evolución es su aplicación como catalizador⁴⁹ especialmente en reacción en la que existen formación y rupturas de enlaces C-C⁵⁰. Existen algunos estudios en los que se hace referencia a la extraordinaria reactividad de NPs de hierro con algunos contaminantes como benzoquinona, tetracloruro de carbono y cloroformo, con la finalidad de desarrollar nuevos métodos de eliminación de estos contaminantes en agua⁵¹. Además, las NPs de Fe^0 presentan superparamagnetismo a un tamaño superior con respecto a las NPs de FeO_x que presentan este comportamiento.

Las NPs de óxidos de hierro presentan también varias aplicaciones como por ejemplo en biomedicina, obtención de imágenes de resonancia magnética más precisas y específicas mejorando el contraste, fabricación de sensores y transductores.

Obtención

Existen diferentes métodos de obtención de NPs de hierro y de óxidos de hierro, entre los que caben destacar: la descomposición térmica del pentacarbonilo de hierro y de compuestos organometálicos de hierro a alta temperatura, la reducción de sales de hierro y óxidos incluido los métodos existentes de microemulsiones para controlar el tamaño⁵², sin olvidar los métodos en fase de vapor⁵³.

Posibles riesgos

Actualmente se están llevando a cabo diferentes estudios de toxicidad basados en análisis de la superficie específica y movilidad, de NPs de hierro y de sus óxidos^{54, 55}. Sin embargo, de momento los datos son muy escasos como para llevar a cabo un estudio riguroso de los riesgos que conlleva el empleo de este tipo de NPs que, se generan en algunos procesos como por ejemplo fundiciones⁵⁶.

NPs de Plata

Las NPs de plata constituyen en la actualidad uno de los nanomateriales más empleados en industria, presente en al menos 600 productos de consumo, desde textiles, electrodomésticos a bactericidas⁵⁷.

Propiedades

La plata metálica presenta propiedades únicas típicas de metales nobles como son una gran estabilidad química, excelente conductividad eléctrica además de presentar actividad catalítica.

Una de las propiedades más importantes es su propiedad antibacteriana determinada por el tamaño de las NPs⁵⁸. Estas NPs actúan sobre la capacidad respiratoria de las bacterias, inhibiendo las enzimas implicadas en el proceso respiratorio. El microorganismo no puede desarrollar mecanismos de resistencia como ocurre con los antibióticos u otros compuestos orgánicos, por lo tanto se produce su muerte.

Obtención

Dentro de los métodos de obtención de NPs se encuentran los métodos físicos y los métodos químicos. Los métodos químicos se basan en la reducción de sales de plata empleando como agentes reductores borohidruro sódico, N, N-dimetil formamida (DMF) o etilenglicol. Como se comentó con anterioridad, en este caso también se emplean sistemas coloidales como por ejemplo poli vinil pirrolidona (PVP) para evitar la aglomeración de las NPs generadas. El tamaño de la partícula, la forma y morfología de las NPs que se obtienen depende de los reactivos reductores empleados, de los disolventes y del tipo de tensioactivo que se emplee¹⁷. De esta forma se obtienen, NPs esféricas, nanocables, nanoprismas, nanocubos de plata^{59, 60}.

Dentro de los métodos físicos destacan la obtención en fase gaseosa, spray por pirólisis y ablación por láser^{61, 62}.

Existen métodos biosintéticos muy económicos y ecológicos que implican el empleo de microorganismos con capacidad de reducir las sales de plata en condiciones normales^{63, 64}.

Aplicaciones

Como se ha comentado las NPs posee propiedades antibacterianas por lo tanto se emplea en la fabricación de cremas y polvos antibacterianos, así como en la elaboración de apósitos, vendajes e implantes biológicos. Su empleo en la fabricación de refrigerantes, aires acondicionados, y otros electrodomésticos, así como en prendas de vestir como calzado, calcetines está muy extendido⁶⁵.

Las NPs de plata presentan además una elevada conductividad así como propiedades ópticas extraordinarias que permiten variar las propiedades ópticas de otros materiales, por lo tanto se está investigando su empleo como biosensores o marcadores biológicos para realizar un diagnóstico precoz de enfermedades como el cáncer.

Posibles riesgos

Puesto que este tipo de NP es la que más se está empleando en la actualidad, dentro de las NP metálicas, se están llevando a cabo un gran número de investigaciones para comprobar cuáles son los riesgos que conlleva el empleo de este tipo de NP metálica. Algunas investigaciones con ratas concluyen que las NPs de plata inhaladas pueden difundirse a otros órganos como el hígado y el cerebro. En el caso de que la vía haya sido cutánea se detectaron NPs en riñón, hígado, bazo, pulmón y cerebro⁶⁶. Al igual que en el caso de otras NPs como los fullerenos puede desarrollarse estrés oxidativo, por un mecanismo similar. En primer lugar las NPs pueden catalizar reacciones Red-Ox originando la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas especies de oxígeno son moléculas muy pequeñas altamente reactivas. Se producen de manera natural como subproducto del metabolismo normal del oxígeno, sin embargo, la presencia de NPs y otras condiciones ambientales pueden aumentar drásticamente sus niveles. Los efectos nocivos de ROS a la célula son: daños en el DNA, y en las proteínas que forman la pared celular.

Además, se puede producir una interacción de las NPs con las proteínas que forman la membrana mitocondrial, lo que conlleva a una alteración de las funciones mitocondriales y, en consecuencia, una mayor producción de ROS⁶⁷.

NPs de Oro

En los últimos años se ha llevado a cabo varias investigaciones con NPs de oro para poder emplearlas en diversas terapias contra la artritis reumatoide aprovechando sus potenciales propiedades⁶⁸.

Propiedades

Las NPs de oro pueden sintetizarse en una variedad de formas incluyendo las nanoesferas, nanohilos, nanocubos, nanoprismas o nanoestrellas. Las propiedades ópticas y electromagnéticas que presentan se deben a su tamaño y forma. De esta forma, en disolución se observa que las NPs esféricas presentan un color rojizo mientras que los nanohilos son de color azul, mientras que el oro metálico macroscópico presenta un color amarillo dorado.

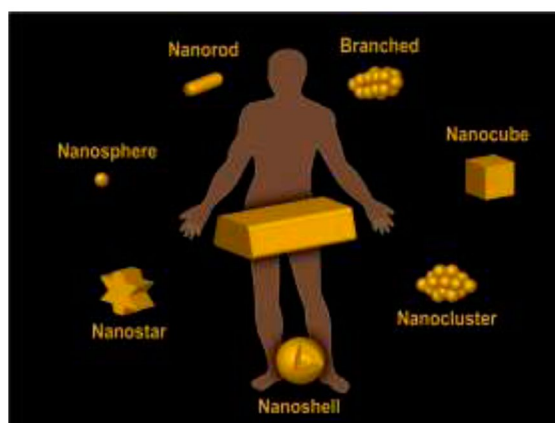


Figura 3. 9. Distintas morfologías de NPs de Oro que pueden obtenerse con fines médicos.

Obtención

Como se observa en la Figura 3.9, las NPs de oro pueden sintetizarse en diferentes formas empleando varios métodos⁶⁹. No obstante, el método más común es por reducción química de una sal de oro. Para obtener una forma u otra se lleva a cabo un control exhaustivo de las condiciones experimentales incluyendo el agente reductor, el tiempo de reacción y la temperatura entre otros⁷⁰.

Para obtener NPs esféricas, por ejemplo, se emplea una disolución de una sal de oro y como reductor citrato sódico^{71, 72}. En ocasiones para conseguir algunas de las formas que se han citado se emplea una semilla para favorecer el crecimiento de las NPs con esa morfología⁶⁹.

Aplicaciones

El uso de oro en la Europa medieval estaba muy extendido para paliar la fiebre y tratar la sífilis. En la medicina moderna se introdujo en antibióticos, y sobre todo en las terapias contra las artritis y reumas.

Lo que se pretende en la actualidad es conocer si las NPs de oro pueden mejorar los resultados de las terapias que se empleaban hace 40 años. Para ello se están llevando a cabo numerosos estudios toxicológicos para conocer los posibles riesgos que conllevaría la administración de estas NPs en el organismo.

Posibles Riesgos

Se ha observado que la toxicidad de las NPs de oro difiere con respecto a la toxicidad del oro macroscópico. El pequeño tamaño de las NPs afecta tanto al proceso de endocitosis como al procesamiento celular. Además, como se ha comentado anteriormente, las NPs presentan una elevada superficie específica, por lo que presenta una elevada toxicidad al estar en mayor contacto con el cuerpo⁶⁸.

Las investigaciones de toxicidad in vivo han demostrado un daño de este tipo de NPs en lípidos y proteínas que forman la pared celular, así como en la cadena de DNA. Además, al igual que las NPs de plata se observa estrés oxidativo debido a la formación de radicales libres⁶⁸.

Cuando las NPs se introducen en el torrente sanguíneo éstas pueden interactuar con componentes de la sangre y causar hemólisis y trombosis⁷³.

Se ha observado que la carga superficial de las NPs influye de manera determinante en la toxicidad. Si las NPs están cargadas positivamente éstas se adhieren con mayor facilidad a la pared celular, mientras que si las NPs están cargadas negativamente, debido a repulsiones electrostáticas es más difícil que éstas se adhieran a la pared superficial⁷⁴.

Quantum Dots (Puntos Cuánticos)

Los quantum dots son nanocristales con un tamaño comprendido entre 1 nm y 10 nm de diámetro de materiales semiconductores (As, Cd, Se, Tl...) que poseen propiedades ópticas únicas debido a efectos cuánticos, de ahí su denominación. La luz emitida puede ajustarse en función de la dimensión de la NPs tal y como se muestra en la Figura 3.10.

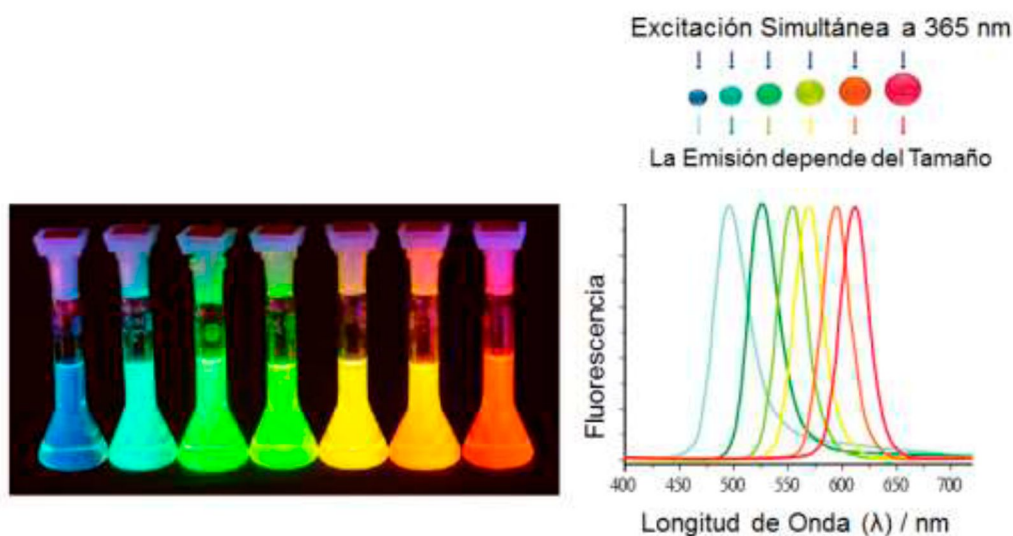


Figura 3. 10. Distinta fluorescencia en función del tamaño de partícula para una determinada longitud de onda de emisión. Fuente: [Delft University of Technology](#)

Obtención

Existen diversos métodos de obtención de puntos cuánticos basados entre los que destacan los físicos y los químicos que permiten un control más estricto de factores de crecimiento, tamaño de partícula, solubilidad y propiedades de emisión. Sin embargo, actualmente el método más común para producir puntos cuánticos es aquel en el que intervienen procesos coloidales que permiten un mayor control en la morfología de las NPs⁷⁵.

Aplicaciones

Una de las aplicaciones más importantes que está en fase de investigación es la que pretende emplear los puntos cuánticos en biomedicina, mayoritariamente como sonda fluorescente en el diagnóstico médico. Esto se conseguiría funcionalizando las

NPs con biomoléculas capaces de adherirse a células cancerosas, de esta forma, se obtendría un diagnóstico más eficiente.

Además, se está estudiando su uso junto con otros nanomateriales como el grafeno, en la fabricación de placas solares de nueva generación donde el rendimiento sea superior a las que existen en la actualidad⁷⁶.

Posibles Riesgos

Los factores que influyen en la toxicidad de los puntos cuánticos son: el tamaño, la carga, la concentración, bioactividad del recubrimiento superficial, estabilidad y composición. Un aspecto fundamental en la utilización de los puntos cuánticos como marcadores biológicos es la estabilidad a largo plazo y la degradación que pueden sufrir, puesto que algunos de sus constituyentes como puede ser el Cd (Cadmio) o el Pb (Plomo) son potencialmente tóxicos⁷⁷.

3.5.3. Nanomateriales basados en Óxidos Metálicos y No metálicos

NPs de Óxido de Silicio (SiO₂)

Las NPs de óxido de silicio son partículas con un tamaño comprendido entre 5 nm – 100nm con una superficie específica entre 25 – 50 m²/g. Las principales formas de la sílice nanométrica son: sílica precipitada, sílica gel, sílice coloidal, sol de sílica y sílica pirogénica⁷⁸.

Obtención

Existen diferentes métodos para la obtención de estas NPs entre los que caben destacar: método sol-gel⁷⁹, descrito con anterioridad, hidrólisis a altas temperaturas de tetracloruro de sílice en reactor a llama⁸⁰, síntesis química en fase gaseosa seguido de deposición química de vapor (CVS/CVD)⁸¹.

Propiedades y Aplicaciones

Las NPs de óxido de silicio presentan interesantes propiedades eléctricas, comportándose tanto como superconductores como conductores y semiconductores con potenciales aplicaciones en electrónica, telecomunicaciones e industria aeroespacial⁸².

Estas NPs se emplean en la elaboración de composites, actuando como aditivos en plásticos y cauchos para mejorar las propiedades mecánicas. Además, se pueden encontrar NPs en rellenos dentales, y chips electrónicos.

Posibles Riesgos

Una enfermedad muy común que encabeza las listas de enfermedades respiratorias de origen laboral en países desarrollados es la silicosis, que es una patología propiciada por la deposición de polvo de sílice en los pulmones, como consecuencia de la inhalación. El organismo intenta eliminar estas partículas que se respiran (menores de 5 micras) segregando enzimas y radicales oxidantes que, como no son capaces de destruir la sílice se liberan al exterior, generando más radicales libres y produciendo una inflamación, dañando el tejido y produciendo fibrosis. Este es uno de los riesgos que conlleva estar expuesto a partículas del orden de 5 micras, por lo que es de esperar que si las partículas son mil veces más pequeñas, los daños que provoquen son impredecibles.

Algunos de los estudios que se han realizado en materia de toxicología de este tipo de NPs en ratas concluyen que se producen alteraciones cardiovasculares y pulmonares, especialmente en ratas con avanzada edad⁸³.

NPs de Óxido de Titanio (IV) (TiO₂)

El óxido de titanio macroscópico se emplea desde hace más de 90 años como pigmento blanco. Aproximadamente el 95% del titanio que se consume es en forma de dióxido de titanio, debido a las múltiples aplicaciones industriales que tiene⁸⁴.

Obtención

Existen diversos métodos para obtener NP de TiO₂ donde destacan: la síntesis sol-gel⁸⁵, los métodos hidrotermales, los métodos solvotermales, la pirólisis en llama y la precipitación por emulsión⁸⁶.

Propiedades y Aplicaciones

El dióxido de titanio con un tamaño de partícula de unos 50 nm es transparente, lo que proporciona una ventaja estética para su empleo en filtros solares. Además, presenta propiedades eléctricas, fotocatalíticas y antimicrobianas.

La producción mundial de dióxido de titanio se estima en unas 10 mil toneladas⁸⁴ al año. Aproximadamente la mitad de la producción se emplea en la industria cosmética donde destaca el empleo como protectores solares.

Otro uso es como catalizador en reacciones de distinta naturales, como por ejemplo, en descomposición de compuestos NO_x en nitratos o N_2 . Esta aplicación se utiliza con frecuencia para eliminar sustancias tóxicas en procesos de tratamiento de aguas.

Las NPs de TiO_2 se utilizan también para aumentar la resistencia al rayado de los revestimientos y en la producción de componentes electrónicos.

Como se ha comentado posee propiedades eléctricas por lo que una de las aplicaciones más prometedoras que se encuentra en fase de investigación es su empleo en la fabricación de placas solares. No obstante, hasta ahora, las placas solares tradicionales fabricadas con silicio presentan mayor eficiencia.

Posibles Riesgos

Los estudios experimentales que se han llevado a cabo en animales expuestos a este tipo de NP, muestran estrés oxidativo, problemas pulmonares y genotóxicos. Se observó que la exposición crónica es un factor potencial para desarrollar tumores.

La Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer ([IARC](#)) ha clasificado el dióxido de titanio como un posible carcinógeno para humanos. El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Laboral de EE.UU (NIOSH) fija los límites ambientales en: 0.3 mg/m^3 para NPs nanométricas ($< 100 \text{ nm}$) y a 2.4 mg/m^3 para partículas finas ($> 100 \text{ nm}$)⁸⁴.

3.5.4. Dendrímeros

Los Dendrímeros son polímeros tridimensionales de forma arborescente. Poseen propiedades como una baja viscosidad intrínseca, alta solubilidad y baja temperatura de transición vítrea, que les hacen excelentes candidatos para fabricar catalizadores, termoplásticos y sensores.

Obtención

De manera general se puede indicar que existen dos rutas para obtener dendrímeros, la convergente⁸⁷ y la divergente⁸⁸. En la primera se construye el dendrímero uniendo los dendrones hacia un núcleo (hacia dentro), mientras que en la segunda se construyen partiendo de un núcleo uniéndole ramificaciones (hacia fuera).

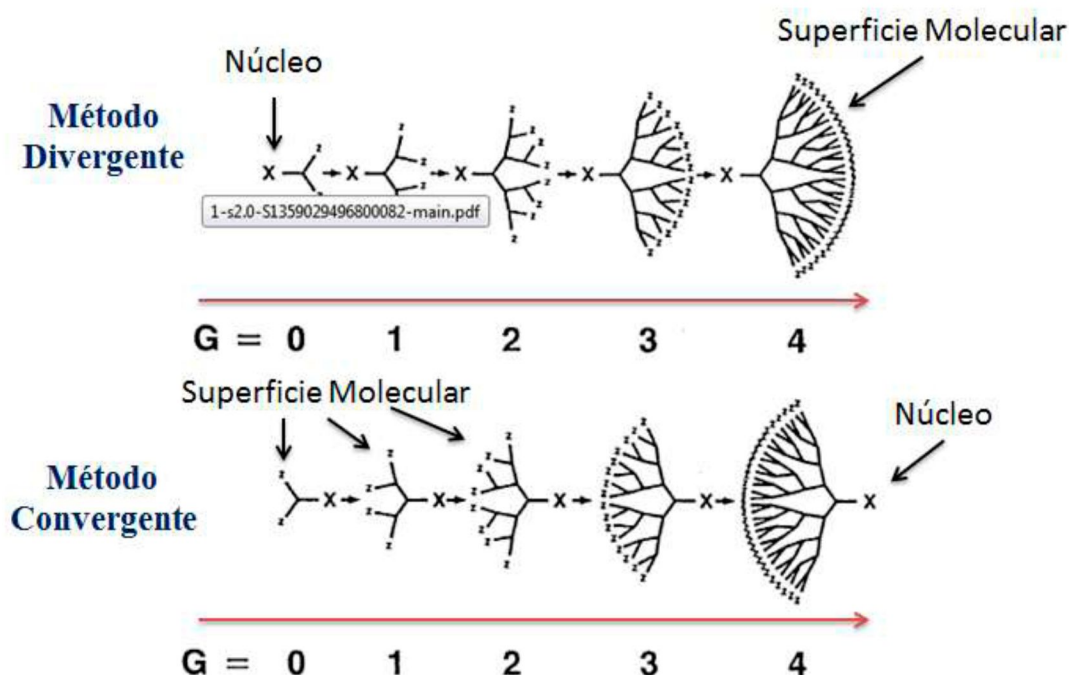


Figura 3. 11. Reproducción de los métodos existentes para la obtención de dendrímeros. Adaptación del esquema propuesto por Tomalia y Dvornic⁸⁸.

Aplicaciones

Son muchas las aplicaciones que presentan los dendrímeros, donde destacan su uso en revestimientos, como catalizador, modificador de la viscosidad, sensores químicos y termoplásticos. Una de las aplicaciones más potenciales, en fase de investigación, es como liberador de fármacos, puesto que presenta naturaleza orgánica (pueden disolverse en su estructura fármacos) y una elevada superficie específica.

Posibles Riesgos

Como en todos los casos, en la actualidad se llevan a cabo investigaciones para conocer los riesgos toxicológicos que presentan estos materiales. Se ha observado que la toxicidad que presentan los dendrímeros está relacionada con el daño que puede producir la interacción de éstos con la pared celular, produciendo daños irreparables en las células. Para solucionar este problema de toxicidad se están llevando a cabo estudios en los que se modifican los dendrímeros superficialmente para que no puedan dañar la pared celular y puedan llevar a cabo su misión de liberadores de fármacos⁸⁹.

3.5.5. Nanocomposites

Como se ha comentado con anterioridad, un composite es un material que surge de la combinación de dos o más materiales diferentes que se mezclan con el propósito de mejorar las propiedades de ambos. Un nanocomposite es, por tanto, un material de dimensiones nanométricas compuesto por dos componentes, uno de *refuerzo* que es el que le confiere las propiedades al material, y otro denominado de *adhesión* que mantiene unido el material de refuerzo.

La ciencia e ingeniería de los nanocomposites trabaja con todo tipo de materiales, desde metales, plásticos o cerámicas hasta biomateriales. Las propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, ópticas, electroquímicas y catalíticas de los nanocomposites difieren notablemente de la de los materiales que lo componen. Estas diferencias son debidas fundamentalmente a la gran superficie que presenta el componente de refuerzo cuando se compara con la que tendría el material macroscópico.

La clasificación más empleada se basa en la naturaleza del componente de adhesión en el nanocomposite. Así se clasifican en cerámicos, metálicos y poliméricos^{90, 91}.

3.6. Aplicaciones

Las aplicaciones industriales de las NPs son muy extensas y van desde el almacenamiento y producción de energía hasta la biología y la medicina, en diagnósticos y tratamientos de enfermedades, pasando por la microscopia, la electrónica y muchas otras aplicaciones. A continuación se muestra un resumen de éstas en la Tabla 3.1.

Campo	Tipo de Nanomaterial y Aplicación
Medicina	• Cremas y Polvos antibacterianos (Ag) • Recubrimientos biocompatibles para implantes (CaCO_3) • Biosensores (óxidos metálicos, polímeros, CNT) • Promotores del crecimiento de Huesos (cerámicas hidroxiapatitas) • Fungicidas (ZnO, Cu_2O) • Resonancia Magnética para detección de tumores (Fe_2O_3, Fe_3O_4) • Localización de células cancerosas (QDs) • Liberadores de Fármacos (Dendrímeros)
Electrónica	• Fibras ópticas (Si) • Circuitos electrónicos (Cu, Al) • Partículas magnéticas para alta densidad de almacenamiento de dato (Fe) • Dispositivos optoelectrónicos (Gd_2O_3, Y_2O_3, dopado con metales de transición)
Bienes de Consumo	• Aditivos en pintura contra el rayado (alúmina, TiO_2) • Revestimiento de cristales para evitar reflejos (TiO_2) • Cremas corporales con vitaminas antioxidantes (nanocápsulas) • Cremas solares (ZnO y TiO_2) • Pelotas de tenis, palas de pádel (CNT, Nanofibras de carbono, Grafeno) • Telas repelentes de manchas y agua (Polímeros)
Medio Ambiente	• Tratamiento de Aguas (Tratamiento fotocatalíticos, TiO_2) • Liberación controlada de herbicidas y pesticidas
Industria Alimentaria	• Potenciadores de sabor y color en comidas y bebidas • Materiales para el envasado de comida • Detección de patógenos en comida
Energía	• Almacenamiento de Hidrógeno (Hidruros metálicos, grafeno) • Catálisis Medioambiental (TiO_2, ZnO, Au) • Electrodo mejorados en batería y supercapacitadores

Tabla 3. 1. Resumen de las aplicaciones de algunos nanomateriales dividido en diferentes campos⁶.

Capítulo 4

Riesgos en la Salud Asociados a la Nanotecnología



*“Ante la existencia de una gran diversidad de disciplinas involucradas en el desarrollo de la Nanotecnología es necesaria la **estandarización de nanotecnologías**; tener unas normas en común con la finalidad de preservar la salud de todas las personas involucradas en el desarrollo de la nanotecnología.”*

Comisión Europea para las Nanotecnologías

4. Riesgos en la Salud asociados a la Nanotecnología

El riesgo para la salud de una sustancia dependerá de la exposición y de las propiedades del material como su toxicidad, biopersistencia, etc. En el estudio de la nanotoxicidad, existen serias lagunas de conocimiento en cuanto a factores fundamentales para la evaluación del riesgo como rutas de absorción, transporte, distribución, traslocación e interacción con los sistemas biológicos de organismos.

En muchos procesos industriales se generan partículas ultrafinas que deben ser claramente diferenciadas de los nanomateriales. En los dos casos se trata de tamaños de partículas menores de 100 nm, sin embargo, las partículas ultrafinas se generan en procesos de sobra conocidos como la combustión de motores diésel, soldadura o fundiciones. Es por este motivo por el que se dispone de mayor información sobre la toxicidad de partículas ultrafinas que de NPs recientemente generadas.

A lo largo de este capítulo se desarrollarán los riesgos asociados a la Nanotecnología, así como los métodos para la evaluación de estos riesgos que se han propuesto en los últimos años.

En primer lugar, es importante señalar las fuentes potenciales de exposición a NPs en diferentes procesos industriales. Algunos ejemplos representativos se muestran en la Tabla 4.1.

4.1. Riesgos Asociados a la Nanotecnología

La nanotecnología es un campo multidisciplinar que se ha ido desarrollando de manera exponencial especialmente en la última década. La rápida aplicación de las nanotecnologías ha ocasionado que no se tenga el conocimiento suficiente respecto a los daños para la seguridad y salud que puedan suponer estos nanomateriales.

Tal y como describe el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo ([INSHT](#)), la acción preventiva frente a los riesgos derivados de las NPs se centra en dos aspectos: la prevención vinculada a su posible toxicidad y la prevención de incendios y explosiones. Como ya se ha comentado, las propiedades tan extraordinarias que presentan las NPs radican en su tamaño, y en su elevada área superficial, lo que supone también un riesgo puesto que cuanto mayor sea el área superficial mayor es el riesgo de

combustión y su toxicidad. Sin embargo, hay otros factores que afectan a la aparición de estos riesgos que se comentarán en el apartado siguiente (Tabla 4.2).

Tipo de Proceso	Fuente
Procesos a alta temperatura	• Refinado de metales • Fundición de aluminio • Fundición de hierro • Galvanizado • Soldadura • Recubrimiento en caliente por spray • Encerado en caliente
Combustión	• Motores diésel, gasolina y gas • Incineración (centrales eléctricas, calefacción, cremación...) • Calefacción de gas
Calidad de ambiente en Interiores – aerosoles relacionados	• Formación de aerosoles por reacción entre emisiones de gas/vapor de la maquinaria de oficina, limpieza. • Contaminación debida a nanoaerosoles ambientales
Procesos mecánicos	• Molienda y mecanizado de metales a alta velocidad
Generación de Polvo mediante procesos de llama	• Producción de negro de carbón • Producción de TiO₂ ultrafino • Producción de sílice amorfa • Producción de alúmina amorfa
Manipulación	• Manipulación de polvo de NPs sin procesar • Manipulación de depósitos de coloides secos
Nanotecnología	• Producción de nanotubos de carbono • Generación en fase gaseosa de NPs • Uso y manipulación de aerosoles de NPs • Sprays de suspensión de NPs, soluciones y lodos

Tabla 4. 1. Fuentes de generación de Nanopartículas. (Adaptado de ref. 92)

Se ha propuesto un esquema con las diferentes fases de identificación, evaluación y caracterización del riesgo de los nanomateriales que se muestra a continuación:

Identificación del Riesgo	Composición Química
	Tamaño de Partícula
	Estructura y Propiedades
Evaluación de la Exposición	Utilización/Durabilidad
	Vías de Exposición
Evaluación de la Toxicidad	Rutas metabólicas
	Reactividad
Caracterización del Riesgo	Probabilidad de los efectos
	Naturaleza de los Efectos
	Efectividad de los controles

Tabla 4. 2. Diferentes Fases en la evaluación de riesgos asociados a la exposición a nanomateriales. (Adaptado de ref. [93](#))

4.1.1. Factores que influyen en la toxicidad de las Nanopartículas

Los factores que pueden influir de una manera u otra en la toxicidad de las NPs se comentan a continuación. (Tabla 4.3)⁹⁴

Factores Químicos

Dentro de los factores físicos destacan la composición química y la solubilidad. Parece lógico que la **composición química** sea un parámetro fundamental en la determinación de la toxicología de un material. En principio cabe esperar que cuanto más tóxico sea el material macroscópico mayor será su toxicidad a nivel nanométrico.

La **solubilidad** en fluidos biológicos es otro parámetro fundamental pues dependiendo de la composición química las NPs presentan mayor o menor solubilidad.

Factores Físicos

Como ya se ha comentado a lo largo de este estudio, el **tamaño** es uno de los parámetros fundamentales a considerar a la hora de evaluar la toxicidad de los nanomateriales. En primer lugar, al presentar un tamaño tan reducido, aumenta la probabilidad para que las NPs atraviesen tejidos y hasta la pared celular. En segundo lugar, como consecuencia de la disminución de su tamaño aumenta significativamente el área por unidad de **superficie** además del número de átomos en la superficie. Como consecuencia de estos hechos aumenta la reactividad del material en comparación con la escala macroscópica.

Las NPs pueden presentar varias **formas** (esfera, cubo, cilindro, estrella, tubo, placa...). Estudios recientes han comprado que la toxicidad es mayor cuando se trata de NPs con forma fibrosa o filamentosa⁹⁴.

El **estado de agregación** es otro factor determinante. Por lo general, las NPs no se encuentran aisladas sino que forman agregados, como consecuencia de la tendencia a disminuir su energía superficial. Este hecho es determinante pues, en función del tamaño se varía el lugar de deposición en el organismo.

Factores Químicos
• Composición Química • Solubilidad
Factores Físicos
• Tamaño • Superficie específica • Forma • Estructura • Estado de Agregación

Tabla 4. 2. Factores que influyen en la toxicidad de las Nanopartículas. (Adaptado de ref. 94)

A continuación se detallan los dos tipos de riesgos que contempla el INSHT⁹³.

4.1.2. Riesgo de incendio y explosión

Según el Laboratorio de Seguridad y Salud Laboral de Reino Unido (HSL), en el caso de polvos micrométricos, la gravedad de explosión es mayor cuanto menor es el tamaño de la partícula^a y por ello los resultados no pueden extrapolarse a las NPs. Por lo tanto, a la espera de disponer de mayor información, la extrapolación directa a la manipulación y exposición a NPs de las medidas adoptadas en la prevención de explosiones de polvos finos y ultrafinos no puede llevarse a cabo.

Las recomendaciones por parte del INSHT frente a este riesgo en el tratamiento y almacenamiento son⁹³:

- Disponer de instalaciones eléctricas antiexplosivas y equipos eléctricos protegidos frente al polvo
- Seleccionar cuidadosamente los equipos contra incendios
- Siempre que sea posible, llevar a cabo la obtención, manipulación y almacenamiento de los nanomateriales en medio acuoso
- Manipular y almacenar los nanomateriales en atmósferas controladas
- Pasivar la superficie de los nanomateriales creando una capa protectora, constituida por sales o diferentes polímeros, que pueda eliminarse antes de la utilización del producto.

Es importante tener en cuenta que son muy pocos los nanopolvos que se fabrican en cantidades importantes para suponer un riesgo de explosión.

4.1.3. Toxicidad

Las propiedades de los nanomateriales, como el área superficial, composición química, tamaño, forma y carga son factores determinantes en las propiedades toxicológicas. Debido a estas propiedades, es de esperar que sean igual o más perjudiciales que las partículas de escala no nanométrica del mismo material.

Los trabajadores pueden estar expuestos a través de tres vías: la vía inhalatoria, que suele ser la más común, la vía dérmica y la vía digestiva.

^a Es importante señalar que no todas las Nanopartículas son inflamables, depende de su composición química además del tamaño que partícula que presente. Por ejemplo, las Nanopartículas de Carbono presentan una mayor tendencia a inflamarse que otras de distinta naturaleza.

Vía Inhalatoria

En función de su tamaño, de la forma y la composición química, los nanomateriales son capaces de penetrar y depositarse en los diferentes compartimentos del aparato respiratorio, en la región extra-torácica incluyendo la boca, fosas nasales, la laringe y la faringe: la región traqueo-bronquial, de la tráquea a los bronquios; y la región alveolar que comprende los bronquiolos y los alvéolos.

La sedimentación puede tener lugar como consecuencia de la sedimentación gravitatoria, por fenómenos de difusión relacionados con los movimientos aleatorios de las partículas muy finas y por la atracción electrostática debida a su carga.

Las partículas de alrededor de 300 nm son las que menos se depositan puesto que son muy grandes para que sufran fenómenos de difusión y muy pequeñas para que los fenómenos de sedimentación tengan influencia sobre ellas.

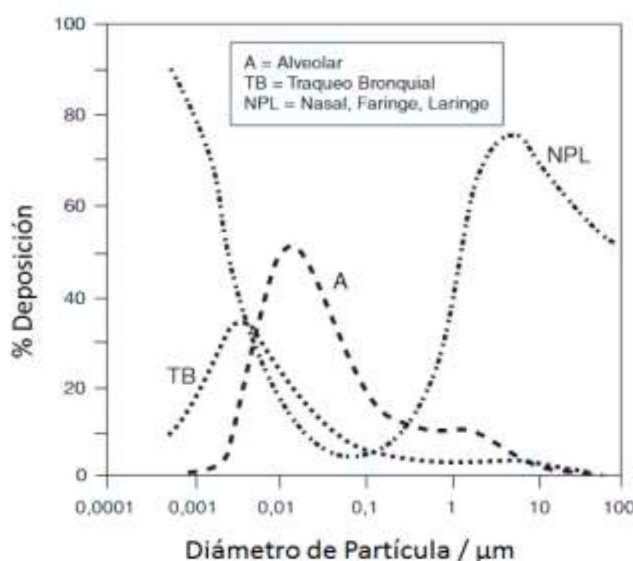


Figura 4. 1. Representación del tanto por ciento que se deposita en diferentes partes del tracto respiratorio en función del tamaño de la partícula. Es importante recordar que $1\mu\text{m} = 1000\text{ nm}$ para poder comprender y estudiar el gráfico. (Gráfico adaptado de ref. 93)

Las partículas ultrafinas superiores a 10 nm (0.01 μm) se depositan mayoritariamente en la región alveolar mientras que aquellas inferiores a 10 nm se depositan principalmente en la región extratorácica⁹³.

En los siguientes apartados se describe con mayor detalle los estudios realizados en humanos, animales sobre el riesgo a inhalación de diversos nanomateriales.

Vía Dérmica

Hasta ahora se han realizado numerosos estudios sobre la penetración directa en la piel de micropartículas. Es de esperar que, puesto que partículas del orden de 1 μm puede penetrar en la piel, las NPs presenten una mayor facilidad para penetrar debido a su reducido tamaño. Hay estudios que sugieren que las NPs pueden penetrar a través de los folículos pilosos, puesto que es donde los constituyentes de las NPs pueden disolverse en condiciones acuosas⁹³.

Vía Digestiva

Como consecuencia de malas prácticas higiénicas durante el manejo de los nanomateriales, o bien a través de la deglución de NPs retenidas en las vías altas del sistema respiratorio, puede producirse la exposición por ingestión. En la actualidad, los efectos de la ingestión de estos nanomateriales están en fase de investigación⁹³.

4.2. Métodos para la Evaluación de los Riesgos sobre la Salud

Para llevar a cabo la evaluación de las propiedades toxicológicas de nanomateriales, tales como toxicidad aguda y crónica, sensibilización, toxicidad reproductiva, genotoxicidad o carcinogeneidad^{95, 96}, se han propuesto métodos de prueba por la Comisión Europea y la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo Económico (OCDE). Estos métodos han sido desarrollados para productos químicos en general, por lo que es de esperar que en un futuro próximo se revisen y actualicen los métodos propuestos para especificarlos al uso de nanomateriales.

Los métodos se pueden dividir en cuatro grupos de acuerdo con el tipo de estudio y el objeto de la investigación:

- Medicina/epidemiología del trabajo
- Métodos in vivo en animales
- Métodos in Vitro
- Método para la determinación de las propiedades fisicoquímicas

La validez y aptitud de los métodos para evaluar los posibles efectos de los nanomateriales sobre la salud, es actualmente debate en todas las comisiones. Es necesaria una caracterización fisicoquímica detallada para poder diferenciar los riesgos de los nanomateriales comparados con los riesgos que supone estar expuesto a los materiales de partida. Como se ha comentado con anterioridad, difieren en características específicas como tamaño de partícula, superficie específica y tendencia a aglomerarse. Es importante señalar que el acondicionamiento y preparación al que se le somete a la muestra para estudiarla, puede influir en los resultados debido a procesos de aglomeración y solubilización^{97, 98}.

A continuación se comentan brevemente los métodos propuestos para la evaluación de riesgos en la salud ante la exposición a nanomateriales:

Medicina/epidemiología del trabajo

Los estudios epidemiológicos y otros hallazgos médicos ofrecen una visión de los daños causados por factores exógenos como los productos químicos o en este caso los nanomateriales. La incertidumbre que rodea a la extrapolación de los resultados de estudios en animales a los seres humanos, se evita mediante la investigación de los posibles efectos en la salud directamente en humanos.

En los últimos años se han llevado a cabo numerosas investigaciones con la finalidad de observar los efectos a la exposición^{99, 100}. Los autores de estos trabajos coinciden en señalar las medidas preventivas y la vigilancia de la salud de los trabajadores como las prioridades en el desarrollo de la Nanotecnología. Como indican, no existe en la actualidad ningún examen médico específico; sin embargo, se pueden realizar reconocimientos médicos generales que en un futuro servirán como base para estudios epidemiológicos. Es por ello, que se recomienda la creación de registros a la exposición de nanomateriales para la realización de estudios epidemiológicos a gran escala.

Método in vivo en animales

Con la finalidad de anticiparse a los estudios médicos y epidemiológicos se llevan a cabo estudios in vivo con animales para estudiar los efectos en el organismo de la exposición a nanomateriales.

En los últimos años se han desarrollado algunos métodos cinéticos que emplean bacterias para estudiar la exposición de estos microorganismos a productos químicos¹⁰¹. El Comité Científico sobre Riesgos Emergentes Recientemente Identificados evaluó los métodos existentes y propuso mejoras⁹⁸ para poder aplicarlos en el estudio de la exposición a nanomateriales.

Existen tres vías de exposición: inhalación, ingestión y dérmica. El método *in vivo* permite estudiar los diferentes efectos; estrés oxidativo y toxicidad pulmonar, investigación sobre la toxicidad en órganos como cerebro, hígado, corazón y riñones (exposición por inhalación e ingestión). En estos estudios se pone de manifiesto la necesidad de una modificación de los requisitos en el estudio de la exposición a nanomateriales.

Métodos in Vitro

La OCDE ha validado numerosos métodos *in vitro* para productos químicos en general, que hacen referencia a los efectos locales en ojos y piel, permeabilidad cutánea y genotoxicidad. Otros métodos que evalúan parámetros toxicológicos como toxicidad o carcinogenicidad, están actualmente en proceso de validación^{102, 103}.

Este método *in vitro* se emplea por ejemplo para evaluar los posibles efectos en el sistema respiratorio, especialmente en los pulmones. Existen diversos estudios en los que analizan las propiedades genotóxicas de productos químicos y su implicación en el daño a la función celular. Alguno de estos se han comentado con anterioridad²⁰.

Al igual que los otros métodos comentados, es necesaria una mejora en las técnicas para predecir los efectos en los seres humanos provocados por los nanomateriales.

4.3. Propiedades Toxicológicas de los Nanomateriales

Actualmente la investigación en nanotoxicología se centra en NPs, nanofibras, nanotubos y nanoplacas, incluyendo los posibles agregados que se formen. Se prevé que la mayoría de los nanomateriales, que se comercializan actualmente, experimentarán un aumento considerable de la cuota de mercado en un futuro no muy lejano, en concreto los que parten de la siguiente materia prima: óxido de aluminio, carbono, nanotubos, dendrímeros, fullerenos, óxido de hierro, poliestireno, plata, oro, óxido de titanio y óxido de cinc.

Las principales vías de exposición que se tratarán en este capítulo son por inhalación y dérmica. La exposición oral presenta, en los estudios que se han consultado, baja relevancia.

Estudios en Seres Humanos

La mayoría de estudios en seres humanos hace referencia al carbón negro, un material nanoestructurado muy empleado. Se ha estudiado en varias investigaciones la relación entre la exposición a negro de carbón y presencia de tumores^{104, 105}. El problema de estos estudios es conocer si los trabajadores estaban expuestos a este material a nanoescala o microescala. Lo mismo sucede en algunos estudios epidemiológicos sobre la exposición a óxido de titanio.

Existen algunos estudios donde se compara la exposición a óxido de cinc en NPs y micropartículas en varios individuos. La exposición por inhalación provocó una deposición en las vías respiratorias, que fue superior a la de las micropartículas¹⁰⁶.

Estudios en Animales

Los estudios en animales representan, en la actualidad, el mejor medio para poder evaluar el riesgo de los nanomateriales, puesto que los estudios en seres humanos y los estudios in Vitro no han sido validados para el caso de los nanomateriales.

La mayoría de los estudios que se han realizado se centran en la toxicidad en el pulmón como consecuencia de la exposición a nanomateriales de diversa naturaleza.

Como consecuencia de la exposición a negro de carbón, se detectó inflamación, citotoxicidad y efectos cardiovasculares en los pulmones, observándose mayor daño en ratas que los ratones y hamsters¹⁰⁷.

De manera similar, se ha llevado a cabo estudios sobre la exposición a NPs de distinta naturaleza como óxido de titanio¹⁰⁸, dióxido de silicio¹⁰⁹, óxido de manganeso¹¹⁰, plata¹¹¹ y fullerenos¹¹². En estos estudios se concluyó que el tamaño y área superficial son factores determinantes en la gravedad de la toxicidad. Se encontraron inflamaciones y toxicidad en pulmones, además de un aumento en los niveles de algunos compuestos como el manganeso y plata en el cerebro, pulmones e hígado.

Para el caso de la exposición a nanotubos de carbono, se ha observado toxicidad pulmonar (inflamación, citotoxicidad y daño tisular), daños similares y comparables a

los efectos de la exposición a amianto¹¹³. El tamaño de los nanomateriales conlleva una mayor probabilidad de que atraviesen la pared celular y puedan llegar a un mayor número de órganos al ser transportados por el torrente sanguíneo, aumentando así el riesgo de toxicidad. La sangre no es el único vehículo que ayuda a distribuir las NPs a otros órganos; la mucosa en este caso, no sólo no actúa como barrera sino que se ha demostrado que, a través de la mucosa, se produce una transferencia de NPs hasta el cerebro¹¹⁴. El reto en la actualidad es investigar la relevancia biológica y las posibles consecuencias toxicológicas a este transporte de NPs por el organismo.

La piel, en cambio, proporciona una mejor protección en comparación con el tracto respiratorio, siempre y cuando que las NPs no presenten un diámetro menor a 10 nm.

Todos los resultados que han sido comentados hasta ahora, se deben a exposiciones controladas y de corto plazo. En los estudios a largo plazo de exposición a NPs de óxido de titanio y negro de carbón nanoestructurado, llevado a cabo en ratas y ratones, determinaron la presencia de tumores provocados por esta exposición. De igual manera, se han llevado a cabo estudios con óxido de aluminio, dióxido de silicio amorfo, obteniéndose resultados similares con la aparición de tumores, inflamación pulmonar y citotoxicidad.

4.4. Evaluación de Riesgos por Exposición a Nanopartículas

Existen diversos métodos de evaluación de riesgos para productos químicos tanto a nivel nacional, europeo e internacional con fines de regulación⁸²; sin embargo, en la actualidad, no hay consenso sobre la aplicación de estos métodos en la manipulación de nanomateriales. Poco a poco, surgen posibles modificaciones de algunos métodos para la caracterización de propiedades físicoquímicas y para la determinación de toxicidad tanto in vivo como in vitro de nanomateriales¹¹⁵.

Puesto que los estudios in vitro no han sido validados para los nanomateriales, los estudios in vivo representan la mejor vía para evaluar el riesgo de los nanomateriales. La futura validación de los métodos in vitro supondría un ahorro tanto económico como laboral, además de no emplear animales en las investigaciones.

En la actualidad, para evaluar la exposición a partículas con un tamaño muy reducido, la norma vigente es aquella que hace referencia al muestreo de aerosoles

UNE-EN-481(1) que consiste en considerar las concentraciones personales en masa por unidad de volumen (por ejemplo $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para cada una de las fracciones (inhalable, torácica y respirable).

La higiene industrial controla las exposiciones de los trabajadores comparando las medidas de las concentraciones de contaminantes en la zona de respiración del trabajador con un valor límite ambiental (VLA). Los VLA son valores de referencia para las concentraciones de los agentes químicos (en este caso NPs) en el aire en las cuales se cree que el trabajador puede estar expuesto día tras día sin sufrir efectos adversos para la salud¹¹⁶. Para poder llevar a cabo una evaluación de este tipo se necesita:

- Disponer de un índice para definir adecuadamente la exposición
- Se debe disponer de los medios analíticos capaces de medir ese índice de exposición. Además, la medida ha de ser representativa del aire que se respira.
- Conocer de datos epidemiológicos causados por ese tipo de NP en esa determinada concentración
- La gran mayoría de estas premisas necesarias para la determinación de un VLA, suponen un reto en la investigación tanto analítica como biomédica.

Es complicado obtener datos que permitan evaluar la exposición personal de los trabajadores, puesto que el volumen de los equipos actualmente disponibles impide el muestreo personal, dificultando la discriminación entre las NPs de fondo y aquellas procedentes realmente de la exposición laboral.

Una cuestión a debate en la actualidad, es sobre cómo definir el índice; puede ser en forma de concentración másica, numérica o de área superficial. Como ya se ha comentado, no existen límites de exposición publicados, entre otros motivos, porque no se conocen los niveles para los cuales las NPs tienen efectos sobre la salud, especialmente para materiales sintéticos de los que no se dispone de estudios epidemiológicos ni toxicológicos y que surgen nuevos nanomateriales continuamente en el mercado.

Por todo esto, se recomienda el empleo de metodologías de “Control Banding” (CB) o metodologías simplificadas de evaluación del riesgo como una alternativa favorable a la espera de poder solucionar los problemas propuestos. Las primeras metodologías de este tipo fueron aplicadas en el campo de la higiene en la industria

farmacéutica y microbiológica dado que en ella se desarrollaban numerosos productos nuevos de los que se desconocía su información toxicológica. Las similitudes en la dificultad de llevar a cabo la evaluación son claras y por ello se propuso una metodología basada en la misma matriz del COSHH Essentials. El INSHT propone algunas modificaciones en esta metodología para su empleo en la evaluación de riesgo a la exposición a NPs¹¹⁷.

La metodología propuesta, considera como parámetros para la evaluación cualitativa la *severidad* y la *probabilidad*. La puntuación de severidad se determina en función de parámetros toxicológicos y la de probabilidad con el riesgo potencial de exposición. El resultado de la evaluación puede dar lugar a 4 niveles de riesgo e indica las medidas necesarias a poner en marcha en cada caso. Estas posibilidades se muestran en la Tabla 4.3.

PROBABILIDAD					
S E V E R I D A D		Extremadamente improbable (0-25)	Poco Probable (26-50)	Probable (51-75)	Muy Probable (75-100)
	Muy Alta (76-100)	RL3	RL3	RL4	RL4
	Alta (51-75)	RL2	RL2	RL3	RL4
	Media (26-50)	RL1	RL1	RL2	RL3
	Baja (0-25)	RL1	RL1	RL1	RL2
RL1: Ventilación General RL2: Ventilación por Extracción localizada o campanas de humos RL3: Confinamiento RL4: Buscar Asesoramiento Externo					

Tabla 4. 3. Matriz de Decisiones en función de dos parámetros: la probabilidad y la severidad. (Adaptado de ref. 117)

Cálculo del parámetro de severidad

La ***severidad*** es el equivalente a la peligrosidad intrínseca de la sustancia de otros métodos simplificados. En la metodología del COSHH Essentials la puntuación se asigna en función de las frases R, lo que no es factible en la mayoría de los casos. La puntuación de severidad se obtiene sumando las aportaciones de 15 factores basados en las propiedades que los autores han considerado más relevantes al evaluar la toxicidad de las NPs.

La puntuación máxima que puede alcanzar está establecida en 100 puntos. Puesto que, como se ha comentado, no existe información sobre todos los parámetros tratados, se considera que si la información toxicológica de uno de los factores es desconocido se le asignará el 75% de la puntuación máxima de dicha categoría.

Los factores considerados para calcular la puntuación de severidad están relacionados con las características del nanomaterial (70% de la puntuación final) y las características del material primario (30% de la puntuación final)¹¹⁷.

Dentro de las características del nanomaterial (70%), se atenderán a las propiedades fisicoquímicas (40%), (química superficial, forma de las partículas, diámetro de la partículas y solubilidad) y propiedades toxicológicas (30%) (Carcinogenicidad, toxicidad para la reproducción, mutagenicidad, toxicidad dérmica y capacidad para producir asma).

Dentro de las características del material primario (30%), atenderemos a las propiedades toxicológicas como toxicidad, carcinogenicidad, toxicidad para la reproducción, mutagenicidad, toxicidad dérmica y capacidad para producir asma¹¹⁷.

Características del Nanomaterial (70%)	
Química Superficial (10) Forma de la Partícula (10) Diámetro de la Partícula (10) Solubilidad (10)	Propiedades Físicoquímicas (40%)
Carcinogenicidad (6) Toxicidad para la reproducción Mutagenicidad (6) Toxicidad dérmica (6) Capacidad para producir asma (6)	Propiedades Toxicológicas (30%)
Características del Material Primario	
Toxicidad (10) Carcinogenicidad (4) Toxicidad para la reproducción (4) Mutagenicidad (4) Toxicidad dérmica (4) Capacidad para producir asma (4)	Propiedades Toxicológicas (30%)

Tabla 4. 4. Factores que se consideran a la hora de obtener la puntuación de severidad. Los factores se dividen entre las características del material primario o macroscópico y las del material a escala nanométrica.

Cada uno de los factores puede obtener un porcentaje de la puntuación alto, medio, bajo o desconocido.

La suma de los puntos de cada parámetro será de un número entre 0 y 100, que corresponderá con una severidad baja, media, alta o muy alta según lo descrito en la Tabla 4.3.

Los factores más fáciles de conocer son la forma y el tamaño, mientras que de la reactividad superficial es más complicado obtener información. En este caso se considerará la capacidad de la sustancia de dar lugar a estrés oxidativo. La solubilidad se considera como en el caso de las partículas con tamaño convencional, solubilidad en fluidos biológicos.

En el caso de los parámetros toxicológicos, la información sobre estos parámetros es muy limitada en la mayoría de los casos y las posibles categorías son “sí” (alto), “no” (bajo) o “desconocido”.

Un nanomaterial se considerará carcinogénico si es cancerígeno tanto en humanos como en animales. Hasta ahora se han identificado pocos nanomateriales como carcinogénicos. Un ejemplo es el dióxido de titanio, clasificado por la IARC como carcinógeno potencial.

Es evidente que resulta más fácil obtener la información necesaria en el caso del material padre. En este caso será posible determinar si es cancerígeno o mutágeno, si la sustancia está clasificada como C1A o C1B, o como M1A o M1B, de acuerdo con el Reglamento (CE) nº 1272/2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas. Este Reglamento está incluido en la Ley 8/2010 de 31 de Marzo relativa además, al registro, a la evaluación, a la autorización y a la restricción de las sustancias y mezclas químicas (REACH).

La Toxicidad puede determinarse a partir del valor límite que indica la Tabla 4.5.^{b, c}

^b Se considera la carcinogenicidad tanto en humanos como en animales.

^c El Material Primario se refiere al material de la misma composición pero de tamaño macroscópico para el que sí existan datos. La puntuación es 0 si el valor límite de larga duración VLA-ED[®] es mayor de 100 µg/m³. (Si no existiera un VLA-ED[®] en España se puede acudir a otras listas de valores límites.

FACTORES A CONSIDERAR		BAJO	MEDIO	DESCONOCIDO	ALTO
NANOPARTÍCULA	Química superficial: reactividad y capacidad de inducir radicales libres	0	5	7.5	10
	Forma	0 (Esférica o compacta)	5 (En diferentes formas)	7.5	10 (Fibrosa o Tubular)
	Diámetro	0 (De 40 a 100 nm)	5 (De 11 a 40 nm)	7.5	10 (De 1 a 10 nm)
	Solubilidad	0	5 Soluble	7.5	10 Insoluble
	Carcinogenicidad	0 no carcinogénica		4.5	6 Carcinogénica
	Toxicidad para la Reproducción	0 no		4.5	6 sí
	Mutagenicidad	0 no		4.5	6 sí
	Toxicidad dérmica	0 no		4.5	6 sí
	Capacidad para producir asma	0 no		4.5	6 sí
MATERIAL PRIMARIO	Toxicidad	2.5 VLA-ED® entre 11 y 100 mg/m³	5 VLA-ED® entre 2 y 10 mg/m³	7.5	10 VLA-ED® entre 0 y 1 mg/m³
	Carcinogenicidad	0 no carcinogénica		3	4 Carcinogénica
	Toxicidad para la Reproducción	0 no		3	4 sí
	Mutagenicidad	0 no		3	4 sí
	Toxicidad dérmica	0 no		3	4 sí
	Capacidad para producir asma	0 no		3	4 sí

Tabla 4. 5. Cálculo de la Puntuación de Severidad. (Adaptado de ref. 117)

En cuanto a la toxicidad dérmica se considera tanto el riesgo de absorción como por contacto cutáneo. Esta información puede observarse en el etiquetado de la sustancia y de las frases R y H que acompañan al etiquetado. (Tabla 4.6 y 4.7)

Frases R			
R21	R26/27	R39/24/25	R48/20/21
R20/21	R34	R39/23/24/25	R48/20/21/22
R20/21/22	R35	R39/27	R48/21/22
R21/22	R36/37	R39/26/27	R48/24
R24	R36/38	R39/27/28	R48/23/24
R23/24	R36/37/38	R39/26/27/28	R48/23/24/25
R23/24/25	R38	R41	R48/24/25
R24/25	R37/38	R43	
R27	R39/24	R43/43	
R27/28	R39/23/24	R48/21	
R26/27/28			

Tabla 4. 6. Frases R de Toxicidad Dérmica.

Frases H		
H310	H318	H370
H311	H319	H372
H312	H334	H373
H314		

Tabla 4. 7. Frases H de Toxicidad Dérmica.

La toxicidad en la reproducción se asignará a materiales que tengan las frases: R60, R61 y R63 o sus frases H equivalentes que serían H360 y H361, mientras que la capacidad de producir asma puede asignarse a materiales etiquetados con las frases R42, R42/43 o H317.

Determinación de la puntuación de probabilidad

La probabilidad de que los trabajadores estén expuestos a NPs depende de la probabilidad de que éstas pasen al ambiente.

Al igual que en el caso de la severidad, la máxima puntuación es 100 y se calcula sumando la puntuación de cada uno de los factores que se comentan a continuación:

- Cantidad emitida de nanomaterial por tarea (25)
- Capacidad de formar nieblas (30)
- Número de empleados con exposición similar (15)
- Frecuencia de operación (15)
- Duración de la operación (15)

En el caso de que se desconozca algún factor, éste supondría el 75% del máximo del valor de ese factor.

Al igual que en el cálculo de la severidad, cada uno de los factores obtiene un porcentaje de la puntuación: alto, medio, bajo o desconocido. En la Tabla 4.8 se muestra las puntuaciones propuestas por los autores^{117, 118, 119}.

Si alguno de los parámetros es considerado nulo, automáticamente se considera el riesgo “*extremadamente improbable*”, porque es evidente que si el material no pasa al ambiente, el resto de los factores considerados no tienen importancia.

Esta metodología simplificada que propone el INSHT constituye una herramienta útil a la hora de evaluar los riesgos por exposición a nanomateriales, más aun conociendo las dificultades para evaluar cuantitativamente el riesgo. Tal y como destaca la autora de la Nota Técnica de Prevención a la que hace referencia este apartado, este método de evaluación simplificado está diseñado para evaluar situaciones de producción a pequeña escala o laboratorios de I+D¹¹⁷. Por lo tanto, se necesitaría modificar atendiendo al cálculo de las puntuaciones de probabilidad en el caso de procesos industriales, y utilizarla en cada fase de producción en la que pudiera haber exposición.

	BAJO	MEDIO	DESCONOCIDO	ALTO
Cantidad Estimada del nanomaterial durante la tarea	6.25 Menores de 10 mg	12.5 Entre 11 y 100 mg	18.75	25 Mayor de 100 mg
Capacidad de formar nieblas	7.5	15	22.5	30
Número de trabajadores con exposición similar⁽¹⁾	5 (6-10)	10 (11-15)	11.25	15 >15
Frecuencia de las operaciones ⁽²⁾	5 Mensual	10 Semanal	11.25	15 Diario
Duración de la operación ⁽³⁾	5 30-60 min	10 1-4 horas	11.25	15 >4 horas
(1) Para menos de 5 trabajadores la puntuación es cero (2) Para una frecuencia menor que mensual la puntuación es cero (3) Para una duración inferior a 30 minutos la puntuación es cero				

Tabla 4. 8. Cálculo de la Puntuación de Probabilidad.

Los conocimientos sobre NPs, y nanotoxicología aumentan rápidamente por lo que los nuevos conocimientos y datos de los que se van disponiendo permitirán refinar el método de evaluación.

4.5. Medidas de Prevención y Protección

A partir de la evaluación de riesgos se toman las medidas de prevención y protección más adecuadas para proteger la salud de los trabajadores. En la mayoría de los casos se adoptarán medidas similares a las que se emplean para el control de la exposición a aerosoles puesto que los datos experimentales indican que ventilación y filtración deberían ser dos medidas efectivas en el control de estos materiales. Es importante tener en cuenta aspectos como por ejemplo:

- La cantidad de materia (masa/nº de partículas)
- Grado de humedad de las nanopartículas. (El nanopolvo seco es más fácilmente dispersable en el ambiente)
- El nivel de contención del proceso
- El tiempo de exposición
- Tendencia que presentan las NPs a aglomerarse

Las medidas que propone el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) mediante las Notas Técnicas de Prevención son las siguientes:

Medidas Técnicas

Se aconsejan las ***medidas técnicas*** en casos en las que se lleven a cabo; trabajos con nanomateriales en fase líquida en operaciones de trasvase, o en las que tiene lugar una agitación elevada; generación de partículas mediante corriente de gas; manejo de polvo nanoestructurado; mantenimiento de equipos y procesos de fabricación de nanomateriales; limpieza de sistemas de extracción utilizados en la captura de NPs.

Las principales medidas de carácter técnico que se aconsejan para los procesos anteriormente citados son las tradicionales de la seguridad e higiene industrial:

Sustitución de las sustancias, procesos y equipos: Siempre que sea posible se aplicará el principio de sustitución, aplicable también a los procesos (prioridad de procesos acuosos frente a secos) y a equipos antiguos u obsoletos.

Diseño: Con el fin de eliminar situaciones de riesgo, es importante disponer de instalaciones seguras, que cumplan el reglamento vigente.

Aislamiento o encerramiento del proceso: Para evitar emisiones de NPs se recomienda aislar el proceso. Las operaciones de riesgo deben realizarse preferiblemente en circuito cerrado y si no fuera posible, en locales cerrados y equipados con sistemas de ventilación que eviten el paso de la contaminación a otras áreas. Es importante tener en cuenta que, en caso de una fuga en el circuito cerrado o en el aislamiento del proceso, las NPs se comportarán como un gas y se dispersarán llegando a cualquier lugar de la planta. Con el tiempo las NPs se aglomeran, dificultando su dispersión en el ambiente.

Captación: En el caso de que no se pueda aislar el proceso se deberá llevar a cabo una captación para evitar su propagación en el ambiente de trabajo y evitar la exposición de los trabajadores.

Ventilación: Por último se llevaría a cabo la ventilación del recinto en el caso de que no se pueda captar. Las especificaciones de los sistemas de extracción deben ser similares a aquellos que se utilicen para gases, vapores y aerosoles. Un sistema de extracción, con un filtro de partículas de alta eficiencia HEPA (High Efficiency Particulate Air) debe ser efectivo para evitar que los nanomateriales pasen al ambiente.

Medidas Organizativas

Algunas normas de trabajo que propone el INSHT pueden ayudar a minimizar la exposición a los nanomateriales:

- No consumir ni almacenar comida y bebida en el puesto de trabajo
- Prohibir la aplicación de cosméticos en lugares donde se manipulen, usen o almacenen nanomateriales
- Disponer de lavabos para lavarse las manos y promover los hábitos de utilizarlos antes de comer o al dejar el puesto de trabajo
- Quitarse la ropa de protección o batas para acceder a otras áreas de trabajo como la cafetería, sala de reuniones, comedor, sala de descanso, etc.
- Facilitar duchas y un lugar adecuado para el cambio de ropa con la finalidad de prevenir la contaminación de otras áreas por transporte de nanomateriales a través de la ropa y la piel.
- Evitar tocarse la cara u otras partes del cuerpo cuando se está expuesto a nanomateriales. El empleo de Equipos de Protección Individual, EPIs, (máscaras, gafas,...) puede ayudar a evitar la transferencia de los nanomateriales.
- Limpiar el área de trabajo como mínimo al final de la jornada laboral empleando sistemas de aspiración dotados de filtros HEPA y sistemas de barridos húmedos

Protecciones Personales

Puesto que la principal vía de exposición es la inhalatoria, la protección recomendada son las respiratorias. Su utilización debe basarse en el criterio profesional y en los resultados de la evaluación de riesgos, y teniendo en cuenta que se utilizan

como último recurso. De tal forma que lo primero que hay que poner en práctica son las medidas técnicas expuestas en las Notas Técnicas de Prevención que propone el INSHT.

Basándose en los resultados obtenidos en el proyecto Nanosafe 2⁹² se determinó que los filtros fibrosos son más eficaces para NPs que para partículas de mayor tamaño. Teniendo en cuenta estos datos bastaría con el empleo de una máscara autofiltrante FFP3. No obstante, en el caso de las NPs el ajuste de la máscara es crítico para evitar la exposición a las mismas, por tanto se recomienda un respirador de presión positiva equipado con filtros P100, que podrían reducirse a P95 si el riesgo se considera bajo.

La otra vía más importante de exposición es la dérmica, cuya exposición puede conducir a la penetración directa de éstas a través de la epidermis. Es por ello por lo que el empleo de guantes (se recomienda que sean de nitrilo) es fundamental cuando se manejen NPs tanto en estado sólido, gaseoso o en disolución. Si se prevé un contacto prolongado se recomienda el uso de dobles guantes, consultando siempre las propiedades del guante con la información que facilita el fabricante.

En general, se recomienda que la ropa de trabajo no sea de algodón. Lo más adecuado sería la ropa de trabajo que incluyera capucha, batas de laboratorio, monos, cubrezapatos, etc de Tyvek[®], un material novedoso que presenta gran resistencia química, opacidad, resistencia a la abrasión y bajo peso.

Control de derrames

Ante una situación de derrame, se debe llevar a la práctica las medidas técnicas comentadas anteriormente. Las pautas a seguir son:

- Utilizar un aspirador equipado con filtro HEPA
- Humedecer el polvo
- Emplear bayetas humedecidas
- Utilizar adsorbentes si el derrame es de un líquido
- Gestionar el material generado en la recogida del derrame como un residuo
- Evaluar la necesidad de la utilización de EPIs. La exposición por inhalación y dérmica será probablemente el mayor riesgo

Capítulo 5

Marco Normativo



Cuando un riesgo no se conoce en todo su alcance, pero la preocupación que suscita es tan grande que se considera necesario adoptar medidas de gestión de riesgos, las medidas deben basarse en el principio de precaución.

Comisión Europea para las Nanotecnologías

5. Marco Normativo

En este capítulo se lleva a cabo una revisión de la normativa en materia de prevención de riesgos laborales atendiendo a su aplicabilidad en la industria nanotecnológica. Además, se comentarán en detalle las decisiones tomadas por las diferentes comisiones europeas encargadas del desarrollo de la normativa sobre nanotecnología y nanomateriales.

5.1. Prevención de Riesgos Laborales. Historia.

Los riesgos asociados a actividades laborales han existido desde que el hombre comenzó a emplear herramientas, desde la Edad de Piedra hasta la actualidad, como algo inherente al hecho mismo del trabajo. La evolución de las normas que han regido en el ámbito laboral se han caracterizado por una extrema lentitud que corresponde a la actitud básica mantenida socialmente, hasta tal punto que se puede decir con certeza que no es hasta hace dos décadas cuando se ha tomado conciencia de la importancia que tiene en el ser humano la prevención de riesgos laborales. En definitiva, no se trata de otra cosa que de proteger la vida durante el desarrollo de una actividad laboral.

Una de las primeras leyes que se aprobaron relacionadas con lo que hoy se conoce como *prevención de riesgos laborales*, es la Ley de Accidentes de Trabajo, conocida como Ley Dato (30 de Enero de 1900). Esta ley, supuso el inicio del desarrollo en España del Derecho de Seguridad e Higiene en el Trabajo. En esta ley se establecía que el patrono era responsable de los accidentes que sucedieran en el trabajo, centrándose en los riesgos profesionales. En 1940 se desarrolló en España una norma general y específica sobre las condiciones de trabajo y sobre las medidas de seguridad e higiene laboral a adoptar en determinadas actividades laborales, lo que quedó plasmado en el Reglamento General de Higiene en el Trabajo. Este reglamento fue derogado por la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo en el año 1971. En el año 1980, se aprobó por Ley el Estatuto de los Trabajadores que contempla el derecho de estos a una protección eficaz en materia de seguridad e higiene, recordando las obligaciones para con ello del empresario.

No es hasta el año 1995 cuando, por primera vez en España, se adopta una Ley con legislación básica y específica sobre la seguridad y la salud en el trabajo, se trata de

la Ley 31/1995 de 8 de Noviembre de Prevención de Riesgos Laborales. Algunos de los puntos más importantes y novedosos de esta ley son los siguientes:

En primer lugar, se favorece una acción preventiva para, de esta forma, garantizar el nivel de protección eficaz en cuanto a la seguridad y la salud de los trabajadores a su servicio. Lo fundamental de esta acción preventiva es concienciar no sólo a los trabajadores sino también perseguir una *cultura de la prevención* a todos los niveles de la población. Para que esta acción preventiva sea eficaz son necesarias algunas acciones concretas de información, formación, consulta y participación de los trabajadores. Éste último es algo fundamental, los trabajadores, que conocen su trabajo con mayor profundidad que las personas ajenas, deben participar activamente informando de posibles riesgos, en la formación para los demás trabajadores de la empresa.

En segundo lugar, en el desarrollo de esta Ley se otorga un papel protagonista al empresario seguido de los trabajadores. Las dos partes deberán cooperar en todo lo necesario para llevar a cabo un plan de prevención eficaz y real en la empresa. La administración velará para que la mejora de las condiciones laborales sea un hecho prestando apoyo y asesoramiento, además de vigilar y controlar el cumplimiento de la normativa.

Esta ley está siendo ampliamente desarrollada mediante reglamentos específicos aprobados por Real Decreto, aplicando lo dispuesto en la legislación comunitaria de la Unión Europea sobre este ámbito.

En la actualidad, en el conjunto de la Unión Europea, la legislación sobre seguridad y salud en el trabajo es objeto de armonización y constituye un cuerpo normativo bastante completo de disposiciones mínimas.

5.2. Normativa referida a Nanotecnología y Nanomateriales

La nanotecnología ha sufrido en la última década una gran evolución como consecuencia de varios factores como por ejemplo la aparición de las técnicas que permiten observar y manipular la materia a nivel nanométrico y el incremento de la financiación mundial. Debido a esto, en la actualidad existe un gran número de grupos de investigación y de empresas que se dedican a la investigación de nuevos nanomateriales. Por ello, es necesario la *estandarización de nanotecnologías*, tener unas

normas en común con la finalidad de preservar la salud de todas las personas involucradas en el desarrollo de la nanotecnología. Otros motivos para la estandarización son; en primer lugar, la existencia de una gran diversidad de disciplinas que contribuyen a la nanotecnología: Química, Física, Biología y Medicina. En segundo lugar la existencia de áreas críticas en el desarrollo de la nanotecnología:

- Coordinación y armonización en todos los estándares
- Terminología y nomenclatura
- Muestreo, mediciones y caracterización
- Salud, seguridad y medioambientales
- Especificaciones de nanomateriales

Con la finalidad de llevar a cabo esta unificación existen diversos grupos de trabajo y comités específicos de nanotecnología, cuyos comunicados, normas e informes, se comentarán con detalle en los siguientes apartados. Estas instituciones, grupos y comités son los siguientes:

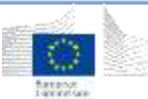
Organismo	Descripción
	Organización Internacional de Normalización <i>ISO/TC 229 Nanotecnologías</i>
	Comité Europeo de Normalización (CEN)
	Asociación Española de Normalización y Certificación
	Comisión Electrónica Internacional <i>IEC/TC 113</i>
	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico <i>Grupo de trabajo de nanomateriales fabricados</i>
	Comisión Europea <i>Nanotecnología</i>

Tabla 5. 1. Organismos tanto Nacionales como Internacionales que se dedican a la normalización en el empleo y uso de nanotecnologías de manera responsable.

5.3. Organizaciones de Normalización

5.3.1 Organización Internacional, Europea y Nacional



La Organización Internacional de Normalización ([ISO](#)) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización (organismos miembros de ISO). Las normas internacionales se realizan normalmente a través de los comités técnicos de ISO. En particular, existe un comité técnico encargado de la elaboración de normas en relación con la nanotecnología, es el [ISO/TC 229](#).

La tarea principal de los comités técnicos es elaborar normas internacionales. Los proyectos de normas internacionales adoptados por los comités técnicos se envían a los organismos miembros para votación. La publicación como norma internacional requiere la aprobación mínima del 75% de los organismos miembros que emiten voto.

La normalización en el ámbito de las nanotecnologías incluye la comprensión y la manipulación de la materia a nivel nanométrico puesto que, como se ha comentado con anterioridad, los nanomateriales presentan propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes a la de los materiales macroscópicos, como consecuencia de su reducido tamaño.

El [Comité Técnico ISO/TC 229 Nanotecnologías](#) tiene por objetivos la elaboración de normas referidas a: terminología y nomenclatura, metrología e instrumentación, seguridad y salud laboral y riesgo ambiental.

En esta comisión existen diferentes subcomités y grupos de trabajo dedicados a los diferentes objetivos que plantea el Comité Técnico 229:

TC 229/CAG: Presidencia del Comité

TC 229/TG 2: Consumo y dimensiones sociales de la nanotecnología

TC 229/TG 3: Nanotecnologías y Sostenibilidad

TC 229/JWG 1: Terminología y Nomenclatura

TC 229/JWG 2: Medición y caracterización

TC 229/JWG 3: Salud, seguridad y medio ambiente de las nanotecnologías

TC 229/JWG 4: Especificaciones de materiales

Además de los diferentes grupos de trabajo organizados dentro de este comité dedicado a la nanotecnología, éste colabora con otros comités técnicos ISO así como europeos y otros organismos externos. En el siguiente gráfico se muestra un esquema de estas colaboraciones que buscan agrupar los conocimientos que se tienen de la nanotecnología en distintas áreas.

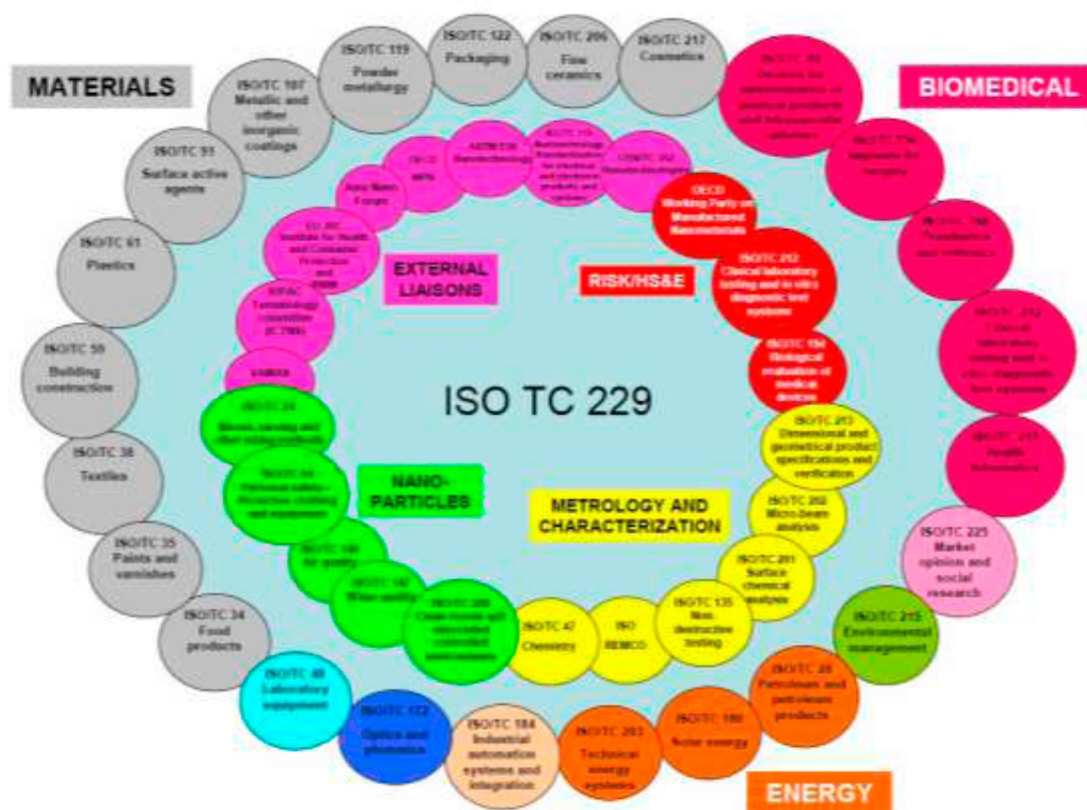


Figura 5. 1. Comité Técnico ISO/TC 229 y las distintas colaboraciones con otros comités en diversos ámbitos.

Este Comité Técnico ISO/TC 229 ha redactado 33 normas ISO de las que algunas se han transpuesto a nivel europeo en el Comité Europeo de Normalización (CEN) y también a nivel nacional (AENOR).

La Asociación española de Normalización y Certificación ([AENOR](http://www.aenor.es)) es una institución española, privada, independiente y sin ánimo de lucro, que contribuye mediante la normalización y certificación (N+C) a mejorar el bienestar de la sociedad a

través de la mejora de la tecnología que producen las empresas. Las principales funciones que desempeña son: En primer lugar, elaborar normas técnicas españolas (UNE) y representar a España en los distintos organismos de normalización regionales e internacionales. En segundo lugar, certificar productos, servicios y empresas. Por último, además desarrolla actividades de formación.

Como en el caso de ISO, en el caso de AENOR también existe un comité específico dedicado a la nanotecnología, que es el AEN/CTN GET 15 – *Nanotecnologías* cuyos objetivos son los mismos que los del Comité Técnico ISO/TC 229.

Dentro del comité AEN/CTN GET 15 – *Nanotecnologías* existen diferentes grupos de trabajo (GT) que son los siguientes:

- GT1: Terminología y Nomenclatura
- GT2: Medición y caracterización
- GT3: Salud, seguridad y medio ambiente
- GT4: Especificaciones de materiales
- GT5: Análisis físico-químico de superficies

Este comité ha elaborado 5 normas que hacen referencia a terminología y definiciones para nano-objetos, a prácticas de seguridad en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías, metodologías de evaluación de la toxicidad de nanopartículas por inhalación.

5.3.2. Otras Organizaciones Internacionales

5.3.2.1. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD)



La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) es una organización intergubernamental que tiene por objetivo promover políticas para un crecimiento económico sostenible y un aumento y mejora del empleo equilibrando los aspectos sociales, económicos y ambientales¹²⁰.

En esta organización hay actualmente ocho grupos de trabajo dedicados a desarrollar aspectos relacionados con la seguridad y salud laboral y medio ambiente en puestos de trabajo de nanotecnología.

En el año 2006 esta organización promovió la creación del Grupo de Trabajo sobre Nanomateriales Manufacturados (GTNM) con el fin de promover la cooperación internacional en materia de prevención relacionada con la salud del trabajador y con la seguridad ambiental de los nanomateriales manufacturados. Los principales objetivos de esta organización son los que se muestran a continuación:

- Crear una base de datos de la OECD sobre nanomateriales para informar y analizar las actividades de investigación llevadas a cabo así como las estrategias de protección de la salud laboral y medioambiental.
- Llevar a cabo estudios toxicológicos (in vivo e in vitro) sobre determinados nanomateriales evitando métodos que emplean animales.
- Promover la cooperación internacional en busca de técnicas de evaluación de riesgos y reglamentos en común.
- Promover técnicas de medición de la exposición y de mitigación de la exposición en todos los niveles.
- Promover el uso ambientalmente sostenible de la nanotecnología a través del aumento del conocimiento sobre los aspectos del ciclo de vida de los nanomateriales.

5.3.2.2. Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)



La Comisión Electrónica Internacional (IEC) es una organización de normalización en los campos eléctrico y electrónico estructurada de manera similar a otras organizaciones, en comités técnicos (TC), comités consultivos (AC) entre otros.

En la actualidad existe un comité técnico el [*IEC/TC 113*](#) encargado de la estandarización de la nanotecnología para productos y sistemas eléctricos y electrónicos colaborando con otras entidades de normalización como ISO.

5.4. Comisiones Europeas dedicadas al campo de la Nanotecnología



En este apartado se comentan los diferentes comunicados de la [Comisión Europea](#) en materia de investigación y prevención de riesgos laborales relacionada con la nanotecnología.

5.4.1. Hacia una estrategia europea para las Nanotecnologías

Una de los primeros comunicados de la comisión europea se dio a conocer en el año 2004¹²¹. Esta comunicación propone una serie de acciones como parte de un enfoque integrado para el mantenimiento y el fortalecimiento de la posición de la I+D europea en el ámbito de las nanociencias y las nanotecnologías. En esta comisión se pide emprender acciones para poder:

- Aumentar la inversión de actividades de I+D y su coordinación con el fin de reforzar la aplicación industrial de las nanotecnologías al tiempo que se mantiene la excelencia científica y la competencia;
- Desarrollar una infraestructura de I+D competitiva y de nivel internacional que tenga en cuenta las necesidades tanto de la industria como de los organismos de investigación;
- Fomentar la educación y formación interdisciplinares del personal de investigación e impulsar el espíritu empresarial;
- Establecer unas condiciones favorables para la transferencia de tecnología y la innovación con el fin de garantizar que la excelencia de la I+D europea se traduzca en productos y procesos generadores de riqueza;
- Integrar las consideraciones sociales en los procesos de I+D en una fase temprana;
- Abordar cualquier *riesgo potencial para la salud, la seguridad, el medio ambiente* y los intereses de los consumidores mediante la generación de los datos necesarios para la *evaluación del riesgo*, integrando la evaluación del riesgo en *todas las fases del ciclo de vida de los productos basados en las nanotecnologías* y adaptando las metodologías existentes y, en caso necesario, desarrollando otras nuevas.

A lo largo de esta comunicación se define el concepto de nanotecnología y sus diversas aplicaciones. Además, se trata en profundidad la financiación de I+D (tanto públicas como privadas) en el ámbito de las nanotecnologías en el mundo.

“¿Cómo garantizar un desarrollo seguro de la nanotecnología?” Esta es una de las preguntas planteadas en la comisión donde se intenta asentar las bases para un desarrollo seguro. A la hora de apoyar esta tecnología de evolución tan rápida, es importante identificar y resolver los problemas (reales o percibidos) en materia de seguridad en una fase lo más temprana posible. Para que los productos que se obtienen con la industria nanotecnológica puedan venderse con éxito se necesita una base científica sólida que disipe las dudas de los consumidores y de la industria. Además, indican, será preciso tomar todas las medidas necesarias para garantizar la salud y la seguridad en el trabajo.

Es fundamental emprender las actividades de I+D necesarias, en paralelo con el desarrollo tecnológico, para recabar los datos cuantitativos necesarios sobre toxicología y ecotoxicología para llevar a cabo la evaluación del riesgo y, si fuera necesario, permitir la modificación de los métodos de evaluación de los riesgos.

Exponen la necesidad de evaluar los riesgos potenciales de las nanopartículas, pues pueden comportarse de forma inesperada debido a su reducido tamaño. Además, pueden presentarse algunas dificultades específicas en relación con su producción, eliminación, manipulación, almacenamiento y transporte. La I+D debe determinar los parámetros adecuados y, en caso necesario, preparar la regulación necesaria teniendo en cuenta todas las personas involucradas: investigadores, trabajadores y consumidores.

En general, destacan, que tanto la salud pública como la protección del medio ambiente y del consumidor, requieren que quienes participan en el desarrollo de las nanotecnologías (investigadores, promotores, productores y distribuidores) hagan frente lo antes posible a los riesgos potenciales de forma directa y sobre la base de datos y análisis científicos fiables y recurriendo a metodologías adecuadas. Este es el principal reto que se plantea en la actualidad en materia de prevención de riesgos laborales en la industria nanotecnológica.

En resumen la comisión destaca la necesidad de:

1. Identificar y abordar las preocupaciones en materia de seguridad (reales o percibidas) lo antes posible;
2. Reforzar el apoyo a la integración de la salud pública, medio ambiente, riesgos y otros temas relacionados en las actividades I+D junto con estudios específicos;
3. Favorecer la generación de datos sobre nanotoxicología y nanoecotoxicología (incluidos los datos sobre la relación entre dosis y respuesta) y evaluar la exposición potencial humana y medioambiental)
4. Pide a los estados miembros que favorezcan los procedimientos de evaluación del riesgo asociado a todo el ciclo de vida de un nanomaterial

5.4.2. Aspectos Reglamentarios de los Nanomateriales

El enfoque “integrado, seguro y responsable” se ha convertido en el elemento central de la política de la Unión Europea en relación con las nanotecnologías. Es por ello que la comisión se propuso una revisión de la normativa de la comunidad europea en los sectores pertinentes¹²².

Desde el punto de vista normativo, el reto es garantizar que la sociedad pueda beneficiarse de las nuevas aplicaciones de la nanotecnología al mismo tiempo que se mantiene un elevado nivel de protección de la salud, la seguridad y el medio ambiente. La legislación aplicable a los aspectos de los nanomateriales ligados a la salud, la seguridad y el medio ambiente es, por el momento, la relativa a las sustancias químicas, la protección de los trabajadores, los productos y la protección del medio ambiente.

En el comunicado de la comisión al Parlamento Europeo, al consejo y al comité económico y social europeo concluyen, quizá de forma baladí, que la legislación actual cubre en gran medida los riesgos de los nanomateriales y reúne las condiciones para abordarlos. No obstante, intuyen unas posibles modificaciones, como por ejemplo la referida a los umbrales aplicados, supeditadas a la disposición de nuevos datos experimentales.

Divide la legislación desde cuatro puntos de vista:

- Productos químicos (Reglamento REACH)
- Protección de los trabajadores
- Productos
- Protección del medio ambiente

En los siguientes apartados se comentan las decisiones adoptadas en esta comisión respecto a cada una de las situaciones planteadas.

5.4.2.1. Reglamento REACH

El Reglamento REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) se fundamenta en el principio de precaución y tiene como objetivo principal el elevar el nivel de protección de la salud humana y del medio ambiente al promover una puesta en el mercado más segura de las sustancias químicas. A diferencia de la normativa de sustancias químicas que regía en la UE hasta la entrada en vigor del REACH, éste se basa en el principio de responsabilidad de los fabricantes, importadores y usuarios intermedios, ya que a ellos corresponde garantizar que sólo fabrican, comercializan o usan, según el caso, sustancias que no afectan negativamente a la salud humana o al medio ambiente. Así, REACH atribuye a la industria la responsabilidad de aportar datos y gestionar los riesgos asociados a las sustancias químicas.

Con arreglo a REACH, los fabricantes e importadores deben presentar un expediente de registro para las sustancias que fabriquen o importen en cantidades superiores a 1 tonelada anual. Si se trata de cantidades superiores a 10 toneladas, deben presentar un informe sobre la seguridad química.

Básicamente, REACH incluye los siguientes procesos:

- Pre-registro y registro
- Evaluación de algunas sustancias por los Estados Miembros
- Autorización de sustancias especialmente preocupantes (cancerígenas, mutágenas, tóxicas para la reproducción, etc.)
- Restricción de usos de sustancias a nivel comunitario

El reglamento REACH no contiene disposiciones que se refieran de manera explícita a los nanomateriales, los cuales, sin embargo, entran en el ámbito de la definición de “sustancia” contenida en el Reglamento.

Si una sustancia química existente que ya ha sido introducida en el mercado como una sustancia en su forma macroscópica, se introduce en el mercado como nanomaterial, es necesaria la actualización del expediente de registro para incorporar en él las propiedades específicas del nanomaterial. La información adicional, incluida la clasificación y el etiquetado específico de la nanoforma y las medidas adicionales oportunas de gestión de riesgos deben incluirse en el expediente de registro.

En el caso de sustancias extremadamente preocupantes, como son aquellas carcinógenas, mutágenas o tóxicas para la reproducción, bioacumulable o persistentes, se exige una autorización para su utilización y su introducción en el mercado. El procedimiento de restricción permite adoptar medidas con respecto a los nanomateriales cuando existe un riesgo derivado de su fabricación, utilización o introducción en el mercado. Los sistemas de autorización y restricción se aplican independientemente de las cantidades producidas o introducidas en el mercado.

Desde la comisión europea se propone que los datos generados en aplicación del Reglamento REACH sirvan como punto de partida para otras reglamentaciones, tales como las que hacen referencia a la protección de los trabajadores, los cosméticos o la protección del medio ambiente.

5.4.2.2. Directivas y reglamentos para la protección de los trabajadores

En el comunicado de la Comisión Europea para las Nanotecnologías, COM (2008), se hace referencia explícita a las diferentes directivas vigentes que tratan la protección de los trabajadores. Expone que la Directiva marco 89/391/CEE puede ser aplicable plenamente a los nanomateriales, puesto que en ella se impone a los empresarios una serie de obligaciones a fin de que adopten las medidas necesarias para la seguridad y la protección de la salud de los trabajadores. Además esta directiva prevé la posibilidad de adoptar nuevas directivas individuales para mejorar así la protección a los trabajadores. En este sentido se han adoptado nuevas directrices asociadas a la exposición de agentes carcinógenos o mutágenos¹²³, riesgos asociados con agentes químicos¹²⁴, utilización de equipos de trabajo y EPIs por parte de los trabajadores en el puesto de trabajo¹²⁵, protección de la salud y seguridad en atmósferas explosivas¹²⁶.

Estas directivas marcan únicamente el camino a seguir, de tal forma que es posible que las autoridades nacionales puedan establecer normas más estrictas.

5.4.2.3. Directivas y Reglamentos referidos a Productos

La legislación existente sobre productos establece una serie de requisitos a unos productos específicos como son los medicamentos, productos fitosanitarios, cosméticos, aditivos de alimentos y de piensos¹²². En la medida en que los nanomateriales contenidos en tales productos constituyan sustancias con arreglo al Reglamento REACH, éstos quedan sujetos a este reglamento, por lo que deben ser objeto también de una evaluación medioambiental.

Con el fin de aumentar el grado de protección, se recomiendan cambios en la reglamentación referida a productos cosméticos introducidos en el mercado sin control previo (Entendiendo por control previo un estudio exhaustivo de la peligrosidad de los nanomateriales). Se clarificarán los requisitos relativos a la evaluación de riesgos, y se exigirán a los fabricantes que indiquen si sus productos contienen nanomateriales y que establezcan un mecanismo para supervisar los efectos sobre la salud de los productos cosméticos introducidos en el mercado.

5.4.2.4. Directivas y Reglamentos para la protección del Medio Ambiente

La normativa sobre medio ambiente pertinente a este tema son: en primer lugar, la que regula la Prevención y el Control Integrados de la Contaminación (PCIC), el control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (Seveso II), y la Directiva marco sobre aguas y una serie de directivas sobre residuos. A continuación se comentan estas normas y directivas en relación con los nanomateriales¹²².

La Directiva PCIC¹²⁷, que se aplica actualmente en más de 52000 instalaciones industriales en toda la Unión Europea, podría servir, en principio, para controlar el impacto medioambiental de los nanomateriales. Sin embargo, si resultara necesario, se tomarían las medidas correspondientes incluyendo nuevas premisas para hacer de esta directiva una herramienta eficaz contra los peligros medioambientales de los nanomateriales.

La Directiva Seveso II¹²⁸ se aplica a los establecimientos en los que hay sustancias peligrosas determinadas por encima de cantidades específicas. De demostrarse que determinados nanomateriales presentan peligro de accidente grave,

pueden ser clasificados, junto con los umbrales correspondientes, en el marco de la Directiva.

La Directiva marco sobre aguas¹²⁹ establece unos principios comunes y un margo general de actuación para la mejora del entorno acuático, así como para reducir progresivamente la contaminación por sustancias prioritarias y suprimir gradualmente las emisiones y vertidos de sustancias peligrosas en el agua. En función de sus propiedades, podrán incluirse como sustancias peligrosas los nanomateriales.

La directiva 2006/12/CE, relativa a los residuos, impone a los Estados miembros la obligación de garantizar que el tratamiento de los residuos no afecte negativamente a la salud y al medio ambiente. Los residuos que contengan nanomateriales podrían clasificarse como peligrosos cuando el nanomaterial presente las propiedades pertinentes que convierten al residuo en peligroso.

La legislación actual de la UE en materia de residuos comprende los requisitos generales para la protección de la salud y el medio ambiente durante la gestión de los residuos. Regula asimismo los requisitos para la gestión de determinados materiales de residuos que pueden contener nanomateriales, si bien no aborda de manera específica los riesgos de los nanomateriales.

5.4.2.5. Hacia una mejora en la Legislación y en su Aplicación

La comisión determina que, en términos generales, la legislación comunitaria comprende los nanomateriales, sin embargo, la aplicación de la legislación debe perfeccionarse. En este sentido son importantes los *métodos de ensayo* y los *métodos de evaluación de riesgos*, las decisiones administrativas y las obligaciones de los fabricantes o de los empresarios.

A día de hoy, la base científica para conocer plenamente todas las propiedades y los riesgos de los nanomateriales no está consolidada, es por ello, por lo que en el comunicado hacen referencia a la existencia de *déficits de conocimiento*¹³⁰.

Cuando un riesgo no se conoce en todo su alcance, pero la preocupación que suscita es tan grande que se considera necesario adoptar medidas de gestión de riesgos, como ocurre actualmente con los nanomateriales, las medidas deben basarse en el principio de precaución.

En estas condiciones, la comisión propone que lo más apropiado sería centrarse en las siguientes actividades:

1. Mejorar la base de conocimientos

Es de vital importancia una rápida mejora de la base de conocimientos científicos que sirva de apoyo a las iniciativas desarrolladas en el ámbito de la legislación. La investigación resulta necesaria en los ámbitos que respaldan la evaluación y la gestión de riesgos como por ejemplo:

La elaboración de datos sobre los efectos tóxicos y ecotóxicos, así como de métodos de ensayo para generar estos datos

La elaboración de datos sobre el uso y la exposición a lo largo del ciclo de vida de los nanomateriales o de los productos que contienen nanomateriales, así como de planteamientos para la evaluación de la exposición

La caracterización de nanomateriales y el desarrollo de normas y nomenclaturas uniformes, así como de técnicas de medición analítica

En lo que se refiere a los aspectos de la salud en el trabajo, el análisis de la efectividad de una serie de medidas de gestión de los riesgos, entre las que destacan el confinamiento de los procesos, la ventilación o los equipos de protección individual tales como equipos de protección respiratoria o guantes

2. Mejorar la aplicación de la Legislación

Los grupos de trabajo de la Comisión, las reuniones de las autoridades competentes y las agencias que coordinan la aplicación de la legislación deberán examinar con carácter permanente la necesidad de nuevas actuaciones y, en caso afirmativo, determinar qué tipo de medidas procede adoptar.

3. Información para los usuarios

Aunque no hay disposiciones del Derecho comunitario que regulen con carácter específico los nanomateriales, éstos deben cumplir las disposiciones vigentes de la legislación comunitaria en materia de etiquetado de productos, advertencias a los consumidores y usuarios en función de las propiedades de los productos, instrucciones de uso, o cualesquiera otros requisitos de información.

La obligación de facilitar información sobre el uso de los nanomateriales y las nanotecnologías debe diferenciarse de las alegaciones de los fabricantes acerca de la presencia de características específicas ligadas al uso de nanomateriales y nanotecnologías. Si tales alegaciones no estuvieran justificadas, cabría invocar las disposiciones comunitarias sobre publicidad falsa o engañosa.

4. Vigilancia del mercado y mecanismos de intervención

Desde la comisión se dedica una atención especial a los distintos instrumentos de la legislación comunitaria que obligan a las autoridades nacionales a intercambiar información o a intervenir cuando un producto presenta o pueda presentar un riesgo a pesar de cumplir los requisitos legales.

Estos instrumentos se plasman en cláusulas de salvaguardia, medidas de supervisión sanitaria, control de los mercados de los alimentos, piensos y pesticidas, objeciones formales a normas, medidas cautelares, procedimientos de vigilancia, medidas basadas en pruebas nuevas o en la revisión de los datos ya existentes, intercambios de información y sistemas de alerta rápida entre otras.

5.4.3. Revisiones de la Normativa

La última comunicación publicada por la Comisión Europea, es una segunda revisión de la normativa sobre nanomateriales. Esta comunicación se enmarca dentro del seguimiento de la comunicación de la comisión de 2008 COM (2008) 366 de 17 de Junio de 2008.

En los siguientes apartados se resumen brevemente las conclusiones alcanzadas en la revisión de la normativa¹³¹.

5.4.3.1. ¿Cómo se definen los Nanomateriales?

Teniendo en cuenta la recomendación de la comisión se establece una nueva definición de *nanomaterial* que será empleada en la legislación de la UE y que será revisada por la comisión en el año 2014. Esta definición es la siguiente: *“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%”.

5.4.3.2. Nanomateriales como vía de crecimiento económico, innovación y competitividad

Hoy en día, parece fundamental hablar sobre políticas de crecimiento, de hechos y acciones que conlleven la contratación de personal cualificado en el ámbito de la nanotecnología.

Un cálculo que realizó la comisión determina que la cantidad total anual de nanomateriales en el mercado mundial es aproximadamente, de unos 11 millones de toneladas, lo que supone un valor de mercado de 20000 millones de Euros.

Los nanomateriales más empleados son el negro de carbón (que representa un 85% de la producción total) y la sílice amorfa (que supone un 12% de la producción total). Existen otros nanomateriales que actualmente se producen en menor proporción pero que están experimentando un crecimiento exponencial; algunos de éstos son nanomateriales basados en: dióxido de titanio, óxido de zinc, fullerenos, nanotubos de carbono y nanopartículas de plata.

Este gran avance hace estimar que el valor de mercado de los nanomateriales se incremente a 2 billones de Euros hasta el año 2015 lo que supondrá la creación de más de 400000 empleos directos, según las últimas estimaciones.

La comisión propone colaborar internacionalmente, en particular con los socios comerciales, para así estimular el desarrollo y la comercialización de aplicaciones basadas en la nanotecnología y el auge del sector industrial.

5.4.3.3. Revisión de los Aspectos Relativos a la Seguridad

El comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados (CCRSERI), el Comité Científico de Seguridad de los Consumidores (CCSC), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) llevan trabajando desde el año 2004 en la determinación de los riesgos de los nanomateriales.

Determinan que los peligros identificados indican que los nanomateriales tienen efectos tóxicos potenciales en el ser humano y el medio ambiente. Sin embargo, señalan que *no todos los nanomateriales inducen efectos tóxicos, por lo que la hipótesis de que*

una sustancia es más tóxica en tanto en cuanto su tamaño sea más pequeño no puede ser respaldada en todos los casos según los datos publicados. Es decir, la toxicidad está condicionada por la naturaleza de los nanomateriales.

5.4.3.4. Ámbito Legislativo

En cuanto a la legislación que trata sobre la seguridad y salud en el trabajo, el subgrupo “Nanomateriales” del Grupo de Trabajo sobre Productos Químicos creado en el marco del Comité Consultivo de Seguridad y Salud en el Trabajo está trabajando en un proyecto de dictamen sobre la determinación del riesgo y la gestión de los nanomateriales en el lugar de trabajo que será ratificado previa revisión antes del año 2014.

En cuanto a la legislación relativa a la seguridad de los productos de consumo, la comisión está trabajando con dos objetivos claros: el primero de ellos adaptar la legislación pertinente al caso de la nanotecnología introduciendo disposiciones específicas relativas a los nanomateriales. En segundo lugar actualizar los correspondientes procedimientos de determinación del riesgo. En tercer lugar, reforzar la vigilancia del mercado puesto que actualmente hay cientos de productos a la venta que contienen nanomateriales. Por último, pretenden mejorar la información y los requisitos sobre el etiquetado de estos productos comerciales.

Ya se están dando algunos pasos para cumplir estos objetivos planteados. Por ejemplo, el Comité de Seguridad de los Consumidores y la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria) han adoptado documentos de directrices sobre la evaluación del riesgo de la aplicación de la nanociencia y la nanotecnología, para aclarar los datos que han de facilitarse cuando se presenta un expediente de solicitud para incorporar un nanomaterial en productos alimenticios, piensos o cosméticos.

En cuanto a la legislación sobre el medio ambiente, la evaluación de ésta ha identificado y evaluado las vías de exposición medioambiental de los nanomateriales pertinentes para cada texto legislativo, el nivel de control permitido respecto a la posible liberación de nanomateriales y los riesgos asociados. La comisión concluye que, en principio, la legislación medioambiental actual pudiera incluir los nanomaterial. No obstante, la identificación de contaminantes gira en torno a la clasificación de peligros con arreglo al Reglamento CLP (Reglamento sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas) y a la información sobre la exposición. Debido a esto aún no se

ha establecido en la legislación medioambiental de la UE ninguna disposición específica, puesto que toda clasificación de un contaminante por el CLP activa automáticamente ciertas disposiciones operacionales y, además, existen muy pocos datos sobre la exposición a los nanomateriales en el medio ambiente.

Por lo tanto, a la vista de estas premisas que expone la comisión, se concluye que el Reglamento REACH es el que establece el mejor marco posible para la gestión del riesgo de los nanomateriales, aunque sí se ha demostrado que es necesario más requisitos específicos. Para ello, la comisión invita a la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA) a elaborar directrices con el fin de promover la mejora en la prevención de riesgos laborales asociados a los nanomateriales.

5.5. Legislación Actual referida a la Salud, Seguridad y Aspectos Medioambientales aplicables a Nanomateriales: Nuevos retos.

En este apartado se comentan algunas directivas vigentes que hacen referencia a la salud y seguridad de determinados productos en los que se emplean nanomateriales. Puesto que no hay una legislación común referida al empleo de nanomateriales, se toman estas como base, aunque, como ya se ha comentado en numerosas ocasiones a lo largo de este capítulo, es necesario revisar las normativas vigentes en función del aumento de conocimiento sobre los posibles efectos negativos en la salud de los nanomateriales.

En este apartado no se tratan todas las directivas, únicamente las que se han considerado fundamentales según la comercialización actual de diferentes productos.

La Directiva Marco 89/391/CEE sobre la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y salud de los trabajadores es una de las más importantes pues se aplica plenamente a los riesgos asociados con nanopartículas. En esta directiva se imponen una serie de obligaciones a los empleadores con el fin de adoptar las medidas necesarias para la protección de la seguridad y la salud de los trabajadores. Los empleadores deben llevar a cabo una evaluación de riesgos y, cuando se detecten adoptar medidas para eliminarlos o minimizarlos cuando no sea posible su eliminación. Esta directiva marco sobre seguridad y salud prevé la posibilidad de adoptar directivas específicas que se establecen en disposiciones más específicas referidas a determinados aspectos de la seguridad y la salud. Algunas de estas directivas que pueden aplicarse en el empleo de nanomateriales son:

- Directiva 2004/37/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, de la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos.
- Directiva 98/24/CE del Consejo, de 7 de abril de 1998 sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo
- Directiva 89/655/CEE del Consejo, de 30 de noviembre de 1989 sobre disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización de equipos de trabajo por los trabajadores en el trabajo
- Directiva del Consejo 89/656/CEE de 30 de noviembre de 1989, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de la utilización de equipos de protección individual en el lugar de trabajo
- Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1999, sobre disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas.

Las directivas de la Unión Europea sobre seguridad y salud laboral establece que los estados miembros podrán establecer directivas más estrictas a nivel nacional; es decir, establecen únicamente unas directrices de actuación básicas que, en muchas ocasiones, pueden necesitar una ampliación más restrictiva.

A continuación se comentan algunas normativas vigentes en casos especiales:

5.5.1. Productos de Cosmética

Como se ha comentado a lo largo de este estudio, en los productos de cosmética cada vez más, están presentes nanomateriales. La Directiva 76/768/EEC determina los compuestos y sustancias que pueden emplearse y las que no se pueden emplear y dentro de qué límites y condiciones es así.

El fabricante debe disponer de la evaluación de la seguridad para la salud humana del producto. Para ello necesita el perfil toxicológico general de los reactivos, su estructura química y el nivel de su exposición.

En esta directiva se tratan cuestiones de uso de determinadas sustancias tóxicas catalogadas y formas de actuación por parte del empresario. Sin embargo, aunque la

mayoría de la directiva se puede emplear para el uso de nanomateriales, la comisión está trabajando en una mejora de ésta para poder aplicarla específicamente en el uso de nanomateriales. Algunos de estos aspectos son:

- Establecer requisitos mínimos en la evaluación de seguridad en el empleo de cosméticos
- La creación de un sistema de cooperación administrativa para coordinar entre los estados miembros la evaluación de los productos

5.5.2. Aerosoles

La comisión reconoce que algunos aerosoles que están en el mercado pueden representar un peligro para la seguridad y la salud, a pesar de que cumplen los requisitos de la Directiva y su anexo para la comercialización. Estos riesgos pueden ser de carácter físico o químico, puesto que el tamaño de gota que se genera es tan pequeño que al inhalarse pasa fácilmente al tejido pulmonar.

Por lo tanto, la revisión de esta Directiva se centrará en los riesgos asociados a la inhalación de spray expulsado por el generador de aerosoles en condiciones normales de uso, teniendo en cuenta el tamaño de las gotas generadas.

5.5.3. Productos Medicinales

Existen diversos procedimientos establecidos en el marco de la Unión Europea, que regulan el uso de los medicamentos, reflejados en la normativa vigente. Sin embargo, no hay normas específicas en este campo que prevean riesgos relacionados con los nanomateriales o la nanotecnología. De esta forma, el Comité para el uso de medicamentos en humanos ha elaborado un documento que invita al a reflexión sobre la utilización de la nanotecnología en medicamentos humanos.

Este comité comenta que es probable que la evaluación de los productos elaborados con una tecnología tan novedosa requiera una consideración especial. Valora de forma muy positiva para conocer los riesgos que presenten los medicamentos nanotecnológicos la acumulación de experiencias, el diálogo entre diferentes instituciones, compartiendo información acerca del uso de determinados nanomateriales en la elaboración de medicamentos de nueva generación.

5.5.4 .Amianto y Nanofibras de carbono

Como se ha comentado, se podría comparar la normativa existente del amianto a la que podría emplearse con nanofibras de carbono.

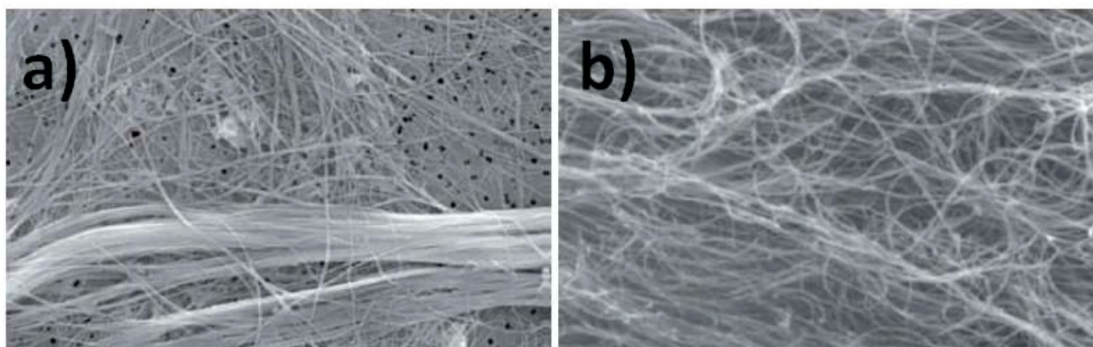


Figura 5. 2. Imágenes obtenidas con microscopía electrónica de amianto (a) y nanotubos de carbono (b)¹³².

El amianto es un mineral que se extrae en minas a cielo abierto. Este mineral está compuesto por fibras microscópicas, y como consecuencia de esta estructura, representa un material muy peligroso debido a la acumulación que se produce en los pulmones como consecuencia de la inhalación. Al no poder ser tratadas, las fibras provocan varias enfermedades entre las que destacan:

- Cáncer de pulmón: es la primera causa de muerte relacionada con el amianto en los pacientes expuestos
- Mesotelioma maligno: Es un cáncer que afecta a la pleura y al peritoneo. Es común en personas expuestas durante menos de treinta años.
- Asbestosis: Enfermedad pulmonar crónica producida por la inhalación de las fibras de amianto. Las fibras, al penetrar en los pulmones, irritan el tejido pulmonar, lo inflaman y provocan con el tiempo una fibrosis pulmonar.

El amianto posee excelentes propiedades aislantes, mecánicas, químicas y de resistencia a altas temperaturas, por lo que fue aplicado durante décadas en aplicaciones industriales y domésticas.

Las medidas de prevención que se toman con el tratamiento del amianto, pueden ser empleadas en muchos casos para el uso de nanofibras de carbono. Es fundamental

evitar la vía de inhalación, puesto que podría producirse una acumulación de las fibras en los pulmones. Puesto que las fibras de carbono presentan un tamaño nanométrico probablemente, según el modelo matemático predictivo del IRCP, se depositen mayoritariamente en la región nasofaríngea mayoritariamente y en la región traqueobronquial. Menos probable es la deposición en la región alveolar⁹³.

5.5.5. Productos Alimenticios

Desde hace más de una década se emplean nanopartículas en alimentos, como potenciadores de sabor, agentes espesantes, colorantes, conservantes o nutrientes. El mayor problema reside en que a día de hoy se siguen investigando los posibles riesgos que causan estas nanopartículas en el organismo. A continuación se nombran algunos ejemplos de nanopartículas presentes en alimentos:

En investigaciones recientes se ha observado la presencia de NPs de carbono en alimentos con azúcar caramelizado y en copos de maíz.

Se adicionan NPs metálicas de cobre, plata y hierro como suplementos adicionales en diversos productos. Otra NP muy empleada es el óxido de titanio que además de estar presente en pinturas, papel y plásticos, se emplea en pasta de dientes y alimentos procesados como por ejemplo: chicles, chocolates, café soluble, helados y otros dulces. Un estudio reciente estima que los niños menores de 10 años consumen entre 1 - 2 mg por kilogramo de masa corporal al día de esta NP¹³³.

Además del uso consciente de determinadas NPs en alimentos, se ha encontrado que, como consecuencia del empleo de NPs en la purificación del agua y de la contaminación de las aguas con productos de cosmética, algunos alimentos como la soja presentan NPs de óxidos metálicos. La consecuencia de ingerir estas NPs todavía se están estudiando¹³⁴.

Por otro lado, las NPs también se encuentran presentes en los recipientes que contienen los alimentos: nanoarcillas en botellas de plástico para evitar la entrada de gases, NPs de óxido de aluminio para mejorar el funcionamiento del papel de aluminio evitando que los alimentos se adhieran y NPs de plata que se utilizan por sus propiedades antibacterianas.

A la vista de la importancia que está tomando la nanotecnología en la industria alimenticia es de vital importancia hacer referencia la legislación actual vigente referida a los alimentos:

Reglamento (EC) No 258/97	Concierne a nuevos alimentos e ingredientes alimentarios que hayan sido sometidos a nuevos procesos y que hayan dado lugar a cambios significativos en la composición o estructura de los alimentos. De esta forma se podría incluir los procedimientos que emplean nanotecnología.
Reglamento (EC) 1935/2004	Relativo a los materiales y objetos destinados a estar en contacto con alimentos o que se pueda esperar que entrarán en contacto con alimentos. Incluye también los materiales de embotellado de agua.
Directiva 89/107/CEE	Referido a aditivos alimentarios empleados con propósito tecnológico en la fabricación, elaboración, preparación, tratamiento, envase transporte o almacenamiento de dicho alimento.
Directiva 2002/46/CE	Directiva sobre complementos alimenticios que establece normas específicas de etiquetado, presentación y publicidad de estos productos y regula la composición en minerales y vitaminas. Es necesaria su modificación para hacer referencia a los compuestos presentes en nanoforma.

Tabla 5. 2. Algunas directivas actuales sobre alimentos.

5.6. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha comentado las diferentes normas, reglamentos y directivas que existen en la actualidad que hacen referencia al uso de la nanotecnología. A continuación se comentan a modo de resumen los aspectos de mayor relevancia:

1. Es necesario favorecer la generación de datos sobre nanotoxicología y nanoecotoxicología y evaluar la exposición potencial humana y medioambiental

2. Reforzar y endurecer las normativas vigentes ante el desconocimiento del efecto de los nanomateriales en la salud humana, en especial, todas aquellas referidas a productos alimenticios.
3. Favorecer la colaboración entre diferentes instituciones a nivel mundial para compartir conocimientos sobre aspectos relacionados con la salud, la seguridad y el medio ambiente de la nanotecnología.

Capítulo 6

Conclusiones



*“Es necesario abordar cualquier **riesgo** potencial para la salud, la seguridad, el medio ambiente y los intereses de los consumidores mediante la generación de los datos necesarios para la **evaluación del riesgo**, integrando la evaluación del riesgo en todas las fases del ciclo de vida de los productos basados en las **Nanotecnologías** y adaptando las metodologías existentes y, en caso necesario, desarrollando otras nuevas”*

Comisión Europea para las Nanotecnologías, 2008

6. Conclusiones

En este capítulo se exponen las conclusiones alcanzadas a lo largo de este estudio monográfico:

1. Es imprescindible aumentar la inversión en investigación relacionada con la toxicología de Nanomateriales puesto que como se ha comprobado existen evidencias de efectos toxicológicos.
2. Dentro de las patologías más comunes a la exposición de nanomateriales están el estrés oxidativo, daños cardiovasculares y mayoritariamente pulmonares como consecuencia de la acumulación de partículas en el sistema respiratorio. Sin embargo, el tamaño de partícula es tan pequeño que puede atravesar fácilmente los tejidos y pasar al torrente sanguíneo por lo que las consecuencias son, de momento, impredecibles.
3. Para poder evaluar de una manera correcta los riesgos que conlleva el empleo de nanomateriales es necesario recopilar toda la información relacionada con las propiedades fisicoquímicas de éstos. Además, se propone la colaboración internacional entre instituciones públicas y privadas, en materia de nanotoxicología. Se pretende de esta manera que aquellos conocimientos de vital importancia para la seguridad de las personas sean de dominio público.
4. No existe una legislación específica para los nanomateriales, a pesar de que en el mercado se encuentran miles de productos que los contienen. Es por ello necesario la redacción de legislación más estricta de carácter internacional. Ésta no es tarea fácil pues el desconocimiento de muchos de los efectos es el factor limitante de este nuevo reto en materia de Prevención de Riesgos Laborales.
5. Ante estas circunstancias que presentan las Nanotecnologías y los Nanomateriales, ha de primar siempre el Principio de Precaución; es decir, se considerará de partida que son materiales peligrosos.

6. Teniendo en cuenta el principio de precaución se han de desarrollar estrategias de seguridad y salud específicas así como estrategias de medición. Uno de los retos actuales es mejorar las técnicas que permiten obtener información acerca de la concentración ambiental de Nanopartículas en el ambiente.
7. La nanotecnología, en la actualidad, sigue siendo desconocida para una gran parte de la población, a pesar de que es la ciencia que se desarrolla con mayor rapidez. Es por ello que en este estudio se ha propuesto la elaboración de un folleto informativo como un principio de lo que debería ser uno de los principales objetivos de la formación en Prevención de Riesgos Laborales en materia de Nanotecnología.

Bibliografía

Bibliografía

1. Feynman, R.P., *Caltech Engineering and Science*, **1960**, 23, 22.
2. Taniguchi, N, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'," Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, **1974**
3. Poole, C.P; Owens, F. J., *Introducción a la Nanotecnología*, Ed. Reverté, **2007**, p.1
4. Blakemore, R.R., *Ann. Rev.Microbiology*, **1982**, 36, 217
5. Hildebrand, M, *Chem. Rev.*, **2008**, 108, 4855
6. Nagarajan, R.; Hatton, T. A., *Nanoparticles: synthesis, stabilization, passivation and functionalization*. ACS symposium series **2008**, p.996
7. Shelley, T., *Nanotecnología: Nuevas promesas, nuevos peligros*, Ed. El viejo topo, **2006**, p.9
8. Alejo, T.; Merchán, M.D.; Velázquez, M.M.; Pérez-Hernández, J.A., *Mat. Chem. Phys.*, **2013**, 138, 286
9. Vázquez, G.; Echevarría, O.; "Introducción a la Microscopía Electrónica Aplicada a las Ciencias Biológicas" Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Fonde Cultura Económica, **2000**, p.121
10. Kroto, H.W.; Heath, J.R.; O'Brien, S.C.; Curl, R.F.; Smalley, R.E., *Nature*, **1985**, 318, 14
11. Drexler, K.E., "Engines of creation: the coming era of nanotechnology" **1987**
12. Iijima, S., *Nature*, **1991**, 354, 56
13. Comisión Europea para las Nanotecnologías. "Hacia una Estrategia europea para las Nanotecnologías", **2004**
14. Kim, B.S.; Lee, Y.; Xu, X.; Park, J-S.; Zheng, Y., *Nat. Nanotechnol.*, **2010**, 5, 574
15. Hernández-Gómez, D., *Revista Redes*, **2012**, nº 24, p. 25,
16. UNE-CEN-ISO/TS 27687. Nanotecnologías. Terminologías. AEN/CTN GET15
17. Velázquez, M.M.; González-Blanco, M.C., *Recent Development in Colloids and Interface Research Vol.1 Part II*, 2003, 347

18. Brinkmalm, G.; Demirev, P.; Fenyő, D.; Hakansson, P.; Kopniczky, J.; Sundqvist, B.U., *Phys. Rev. B*, **1993**, 47, 7560
19. Parker, D.; Chatterjee, K.; Wurz, P.; Lykke, K.; Pellin, M.J.; Stock, L.M., *Carbon*, **1992**, 30, 1167
20. Oberdörster, E.; *Environmental Health Perspectives*, **2004**, 112
21. Monthieux, M.; Kuznetsov, V.L., *Carbon*, **2006**, 44, 1621
22. Journet, C.; Maser, W.K.; Bernier, P.; Loiseau, A.; Lamyde, M.; Deniard, P.; Leek, R.; Fischerk, J.E., *Nature*, **1997**, 388, 756
23. Kong, J.; Cassel, A.; Dai, H.; *Chem. Phys. Lett.*, **1998**, 292, 567
24. Thess, A., *Science*, **1996**, 273, 483
25. Yudasaka, M.; Kokai, F.; Takahashi, K.; Yamada, R.; Sensui, N.; Ichihashi, T.; Iijima, S., *J. Phys. Chem. B*, **1999**, 103, 3576
26. Groover, M.P., “*Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*” Ed. Pearson. Prentice Hall. **1997**
27. Merino, C.; Soto, P.; Vilaplana, E.; Gómez, J.M.; Pico, F.; Rojo, J.M., *Carbon*, **2005**, 43, 551.
28. Rao, G.; Lu, C.; Su, F., *Separation and Purification Tecnology*, **2007**, 58, 224
29. Liu, Z.; Chen, K.; Davis, C.; Sherlock, S.; Cao, Q.; Chen X.; Dai, H., *Cancer Res.*, **2008**, 68, 6652
30. Zhang, Y.; Ali, S.; Dervishi, E.; Xu, Y.; Li, Z.; Casciano, D.; Biris, A., *ACS Nano*, **2010**, 4, 3181
31. Bolotin, K. I.; Sikes, K.J.; Jiang, Z.; Klima, M.; Fudenbeerg, G.; Hone, J.; Kim, P.; Stormer, H.L., *Solid State Comun.*, **2008**, 146, 351
32. Baladin, A. A.; Ghosh, S.; Bao, W.; Calizo, I.; Teweldebrhan, D.; Miao, F.; Lau, C.N., *Nano Lett*, **2008**, 8, 902.
33. Lee, C.; Wei, X.; Kysar, J.; Hone, J., *Science*, **2008**, 321, 385.
34. Stoller, M.D.; Park, S.; Zhu, Y.; An, J.; Ruoff, R.S., *Nano Lett*, **2008**, 8, 3498
35. Novoselov, K.S.; Geim, A.K.; Morozov, S.V.; Jiang, D.; Zhang, Y.; Dubonos, S.V.; Grigorieva, I.V.; Firsov, A.A., *Science*, **2004**, 306, 666.

36. Hummers, S.W.; Offeman, E.R., *J. Am. Chem.Soc.* **1958**, 80, 1339.
37. Martín-García, B.; Velázquez, M.M.; Rossella, F; Bellani, V; Diez, E; Fierro, J.L.; Pérez Hernández, L.A.; Hernández-Toro, J; Claramunt, S; Cirera, A., *ChemPhysChem*, **2012**, 13, 3682
38. Tapas, K.; Sambhu, B.; Yao, D.; Kim, N.; Bose, S.; Lee, J., *Prog.Pol. Sci.*, **2010**, 35, 1350
39. Dreher, K.L., *Toxicol. Sci.*, **2004**, 3, 77
40. Zhang, Y.; Ali, S.F.; Dervishi, E.; Xu, Y.; Li, Z.; Casciano, D., *ACS Nano*, **2010**, 4, 3181
41. Wang, K.; Ruan, J.; Song, H.; Zhang, J.; Wo, Y.; Guo, S.; *Nanoscale Res. Lett.*, **2010**, 6, 1
42. Hu, W.; Peng, C.; Luo, W.; Lv, M.; Li, X.; Li, D., *ACS Nano*, **2010**, 4, 4317
43. Chang, Y.; Yang, S-T.; Liu, J-H.; Dong, E.; Wang, Y.; Cao, A., *Toxicol. Lett.*, **2010**, 200, 201
44. Baan, R.; Straif, K.; Grosse, Y.; Secretan, B.; Ghissassi, F.; Coglianò, V., *The Lancet Oncology*, **2006**, 7, 295.
45. Peng, S.; Wang, C.; Xie, J.; Sun, S., *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, 128, 10676
46. Sohn, K.; Kang, S.; Ahn, S.; Woo, M.; Yang, S., *Environ. Sci. Technol.*, **2006**, 40, 5514
47. Bodker, F.; Mørup, S.; Linderøth, S., *Phys. Rev. Lett.*, **1994**, 72, 282
48. Sonnenberg, J.; Coombs, N.; Dube, P.; Morris, R., *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, 134, 5893
49. Li, W.; Zhou, W.; Li, H.; Zhou, Z.; Zhou, B.; Sun, G.; Xing, Q., *Electrochimica Acta*, **2004**, 49, 1045
50. Huber, D.L., *Small*, **2005**, 1, 482
51. Nurmi, J.; Tratnyek, P.; Sarathy, V.; Baer, D.; Amonette, J.; Pecher, K.; Wang, C.; Linehan, J.; Matson, D.; Penn, R.; Driessen, M., *Environ. Sci. Technol.*, **2005**, 39, 1221
52. Capek, I., *Adv. Coll. and Inter. Sci.*, **2004**, 110, 49
53. Park, K.; Jang, H.; Choi, C., *Aerosol Science and Technology*, **1998**, 28, 215
54. Roth, C.; Ferron, G.A.; Karg, E.; Lentner, B.; Schumann, G.; Takenaka, S.; Heyder, J., *Aerosol Science and Technology*, **2004**, 38, 228

55. Midander, K.; Pan, J.; Wallinder, I.O.; Leygraf, C., *J. Environ. Monit.*, **2007**, 9, 74
56. Evans, D.E.; Heitbrink, W.A.; Alavin, T.J.; Peters, T.M., *Ann. Occup. Hyg.*, **2008**, 52, 9
57. Woodrow Wilson Centre. Woodrow Wilson Nanotechnology Consumer Products [Inventory](#). **2008**
58. Pal, S.; Tak, Y.; Song, J., *Appl. Environ. Microbiol.*, **2007**, 73, 1712
59. Pastoriza-Santos, I.; Liz-Marzán, L.M., *Nano Lett.*, **2002**, 2, 903
60. Sun, Y.; Xia, Y., *Science*, **2002**, 13, 2176
61. Backman, U.; Jokiniemi, J.K.; Auvinen, A.; Lehtinen, K.E.J., *Journal of Nanoparticles Research*, **2002**, 4, 325
62. Jiménez, E.; Abderrafi, K.; Martínez-Pastor, J.; Abargues, R.; Valdés, J.L.; Ibáñez, R., *Superlattices and Microstructures*, **2007**, 43, 487
63. Chen, J.C.; Lin, Z.H.; Ma, X.X., *Applied Microbiology*, **2003**, 37, 105
64. Durán, N.; Marcato, P.D.; De Souza, G.I.H.; Alves, O.L.; Esposito, E., *J. Bio. Nanotech.*, **2007**, 3, 203
65. Vigneshwaran, N.; Kathe, A.A.; Varadaraian, P.V.; Nachane, R.P.; Balsubramanva, R.H., *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **2007**, 7, 1893
66. Tang, J.; Xiong, L.; Wang, S.; Wang, J.; Liu, L.; Li, J.; Yuan, F.; Xi, T., *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **2009**, 9, 4924
67. Haase, A.; Tentschert, J.; Jungnickel, H.; Graf, P.; Manton, A.; Draude, F.; Plendl, J.; Goetz, M.; Galla, S.; Thuenenmann, A.F.; Taubert, A.; Arlinghaus, H.F.; Luch, A., *Journal of Physics: Conferences Series*. **2011**, 304, 012030
68. Thakor, A.S.; Jokerst, J.; Zavaleta, C.; Massoud, T.F.; Gambhir, S.S., *Nano Lett.*, **2011**, 11, 4029
69. Grzelczak, M.; Pérez-Juste, J.; Mulvaney, P.; Liz-Marzan, L.M., *Chem. Soc. Rev.*, **2008**, 37, 1783
70. Murphy, C.J.; Sau, T.K.; Gole, A.M.; Orendorff, C.J.; Gao, J.; Gou, L.; Hunyadi, S.E.; Li, T., *J. Phys. Chem. B*, **2005**, 109, 13857
71. Turkevich, J., *Discuss. Faraday Soc.*, **1951**, 55
72. Frens, G., *Nat. Phys. Sci.*, **1973**, 241, 20

73. Aillon, K.L.; Xie, Y.; El-Gendy, N.; Berkland, C.J.; Forrest, M.L., *Adv. Drug. Deliv. Rev.*, **2009**, 61, 457
74. Goodman, C.M.; McCusker, C.D.; Yilmaz, T.; Rotello, V.M., *Bioconjugate Chem.*, **2004**, 15, 897
75. Rajh, T.; Micic, O.; Nozik, A., *J. Phys. Chem.*, **1993**, 97, 11999
76. Guo, C.; Yang, H.; Sheng, Z.; Lu, Z.; Song, Q.; Li, C., *Angrew. Chem.*, **2010**, 49, 3014
77. Informe UNE-ISO/TR 12885 IN. *AEN/GET15 Nanotecnologías*. **2010**
78. Theodore, L.; Kunz, R.G. “*Nanotechnology: environmental implications and solutions*” New York. Wiley, **2005**
79. Schimidt, H.K.; Geiter, E.; Menning, M.; Krug, H.; Becker, C.; Winkler, R., *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **1998**, 13, 397
80. Smolík, J.; Moravec, P., *Journal of Materials Science Letter*, **1995**, 14, 387
81. Heel, A.; Kasper, G., *Aerosol Science and Technology*, **2005**, 39, 1027
82. European Agency for Safety and Health at Work. “*Workplace exposure to Nanoparticles.*”
83. Chen, Z.; Meng, H.; Xing, G.; Yuan, H.; Zhao, F.; Liu, R.; Chang, X.; Gao, X.; Wang, T.; Jia, G.; Ye, C.; Chai, Z.; Zhao, Y., *Environ. Sci. Technol.*, **2008**, 42, 8985
84. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council and the European Economic and Social Committee on the Second Regulatory Review on Nanomaterial. COM (2012) 572 final
85. Bischoff, B.L.; Anderson, M.A., *Chem. Mat.*, **1995**, 7, 2
86. Pan, D.; Zhao, N.; Wang, Q.; Jiang, S.; Ji, X.; An, L., *Adv. Mater.*, **2005**, 17, 1991
87. Hecht, S.; Freche, J., *Angrew.Chem.*, **2001**, 40, 74
88. Dvornic, P.; Tornalia, D., *Colloid & Interface Science*, **1996**, 1, 221
89. Jain, K.; Kesharwani, P.; Gupta, U.; Jain, N.K., *Int. J. Pharma.*, **2010**, 394, 122
90. Twardowski, T. E., *Introduction to Nanocomposites Materials: Properties, Processing, characterization*. DEStech Publications, Inc. **2006**, p.1
91. Varadan, V. K.; Pillai, A. S.; Mukherji, D., *Nanoscience and Nanotechnology in Engineering*. World Scientific Publish. **2009**, p.215

92. Tanarro-Gozalo, C.; Gálvez-Pérez, V., *Seguridad y Salud en el Trabajo*. INSHT, **2009**, 52, 33
93. Rosell-Farràs, M.G.; Senovilla, L.P., *Nota Técnica de Prevención 797*. INSHT.
94. Tanarro-Gozalo, C.; Gálvez-Pérez, *Centro Nacional de Nuevas Tecnologías*. INSHT.
95. Comisión Directiva [2001/59/EC](#), 2001
96. European Commission Joint Research Centre Institute for Health and Consumer Protection, [Technical Guidance Documents](#), accessed on 30 September 2008.
97. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), Modified [opinion on the appropriateness of existing methodologies](#) to assess the potencial risks associated with engineered and adventitious products of nanotech., 2008
98. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk, The synthesis report on the public consultation of the SCENIHR [opinion on the appropriateness of existing methodologies](#) to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies, 2008
99. Schulte, P.; Trout, D.; Zumwalde, R.; Kuempel, E.; Geraci, C.; Castranova, V.; Mundt, D.; Mundt, K.; Halperin, W., *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, **2008**, 50, 517
100. Schulte, P.; Trout, D.; Zumwalde, R.; Kuempel, E.; Geraci, C.; Castranova, V.; Mundt, D.; Mundt, K.; Halperin, W., *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, **2008**, 50, 517
101. Nasterlack, M.; Zober, A.; Oberlinner, C., *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, **2008**, 81, 721
102. European Commission Joint Research Centre, [Testing methods](#), accessed on 22 September **2008**.
103. Sayes, C.M.; Reed, K.L.; Warheit, D.B., *Toxicological Sciences*, **2007**, 97, 163
104. Maynard, A.D., Report on [in vitro methods](#) for assessing the toxicity of nanoparticles, NRCG Task force 3, 2008
105. Wellmann, J.; Weiland, S.K.; Neiteleer, G.; Klein, G.; Straif, K., *Occup. Environ. Med.*, **2006**, 63, 513
106. Morfeld, P.; Buchte, S.F.; McCunney, R.J.; Piekarski, C., *J. Occup. Environ. Med.*, **2006**, 48, 1253

107. Beckett, W.S.; Chalupa, D.F.; Pauly-Brown, A.; Speers, D.M.; Stewart, J.C.; Frampton, M.W.; Utell, M.J.; Huang, L.-S.; Cox, C.; Zareba, W.; Oberdörster, G., *American journal of respiratory and critical care medicine*, **2005**, 171,1129
108. Carter, J.M.; Corson, N.; Driscoll, K.E.; Elder, A.; Finkelstein, J.N.; Harkema, J.N.; Gelein, R.; Wade-Mercer, P.; Nguyen, K.; Oberdörster, G., *J Occup Environ Med*, **2006**, 48,1265
109. Chen, H.W.; Su, S.F.; Chien, C.T.; Lin, W.H.; Yu, S.L.; Chou, C.C.; Chen, J.J.W.; Yang, P.C., *The FASEB Journal*, **2006**, 20, 2393
110. Warheit, D.B.; Webb, T.R.; Colvin, V.L.; Reed, K.L.; C.M., Sayes, *Toxicol Sci*, **2006**, 95, 270
111. Elder, A.; Gelein, R.; Silva, V.; Feikert, T.; Opanashuk, L.; Carter, J.; Potter, R.; Maynard, A.; Ito, Y.; Finkelstein, J.N.; Oberdörster, G., *Environ Health Perspect*, **2006**, 114, 1172
112. Ji, J.H.; Jung, J.H.; Kim, S.S.; Yoon, J.U.; Park, J.D.; Choi, B.S.; Chung, Y.H.; Kwon, I.H.; Jeong, J.; Han, B.S.; Shin, J.H.; Sung, J.H.; Song, K.S.; Yu, I.J., *Inhal Toxicol*, **2007**, 19, 857
113. Sayes, C.M.; Marchione, A.A.; Reed, K.L.; Warheit, D.B., *Nano Letters*, **2007**, 7, 2399
114. Takagi, A.; Hirose, A.; Nishimura, T.; Fukumori, N.; Ogata, A.; Ohashi, N.; Kitajima, S.; Kanno, J., *The Journal of Toxicological Sciences*, **2008**,33, 105
115. Oberdörster, G.; Sharp, Z.; Atudorei, V.; Elder, A.; Gelein, R.; Kreyling, W.; Cox, C., *Inhalation Toxicology*, **2004**, 16, 437
116. Oberdörster, G.; Maynard, A.D.; Donaldson, K.; Castranova, V.; Fitzpatrick, J.; Ausman, K.; Carter, J.; Karn, B.; Kreyling, W.G.; Lai, D.; Olin, S.; Monteiro-Riviere, N.; Warheit, D.; Yang, H., *Part Fibre Tox*, **2005**, 2
117. Tanarro-Gozalo, Celia; Sousa-Rodríguez, M^a Encarnación; Tejedor-Traspaderne, José N., *Centro Nacional de Nuevas Tecnologías*. INSHT.
118. Tanarro-Gozalo, Celia; *Nota Técnica de Prevención 877*. INSHT.
119. Paik S.Y.; Zalk, D.M.; Swuste, P., *Ann Occup Hyg*, **2008**, 52, 419
120. Zalk, D.M.; Paik, S.Y.; Swuste, P., *Important issues on risk assessment of manufactures Nanomaterials*. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials Organisation for Economic Co-operation and Development, **2009**, 33

121. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo y al Comité Económico y Social Europeo. *Hacia una estrategia europea para las nanotecnologías*. COM (2004).
122. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo y al Comité Económico y Social Europeo. *Aspectos Reglamentarios de los Nanomateriales*. COM (2008).
123. Directiva 2004/37/EC of 29 4 2004; OJ L 158, 30.4.2004
124. Directiva 98/24/EC of 7 4 1998; OJ L 131, 5.5.1998
125. Directiva 89/655/EEC of 30 11 1989; OJ L 393, 30.12.1989
126. Directiva 1999/92/EC of 16 12 1999; OJ L 23, 28.1.2000
127. Council Directive 2008/1/EC concerning integrated pollution prevention and control; OJ L 24, 29.01.2008
128. Directive 96/82 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances; OJ L10 of 14.1.1997
129. Directiva 2006/12/EC; OJ L 114, 27 4 2006
130. Meeting of OECD's Working Party on Manufactured Nanomaterials ([WPMN](#)).
131. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo y al Comité Económico y Social Europeo. *Segunda revisión de la normativa sobre los nanomateriales*. COM SWD (2012)
132. Navas Antón, José M^a; Departamento de Medio Ambiente. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). *Revista Higiene Industrial*, 2009, 114, 6
133. Weirt, A.; Westerhoff, P.; Fabricius, L.; Hristovski, K.; Goetz, N., *Environ. Sci. Technol.*, 2012, 46, 2242
134. Priester, J.H.; Gea, Y.; Randall, E.; Horst, A.; Cole Moritz, S.; Espinosa, K.; Gelb, J.; Walker, S.; Nisbet, R.; An, Y-J; Schimel, J.; Palmere, R.; Hernandez-Viezcas, J.A.; Zhao, L.; Gardea-Torresdey, J.L.; Holden, P.H., *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PANS)*, 2012

Anexos

Glosario

Glosario

Accidente de trabajo: Toda lesión corporal que sufre el trabajador con ocasión o por consecuencia del trabajo ejecutado por cuenta ajena.

Dendrímeros: Son polímeros tridimensionales de forma arborescente. Poseen propiedades como una baja viscosidad intrínseca, alta solubilidad y baja temperatura de transición vítrea, que les hacen excelentes candidatos para fabricar catalizadores, termoplásticos y sensores.

Enfermedad profesional: Aquella enfermedad contraída a consecuencia del trabajo ejecutado por cuenta ajena en las actividades que se especifican en el cuadro que se apruebe por las disposiciones de aflicción y desarrollo de la ley de prevención de riesgos laborales.

Epidemiología: Ciencia que estudia y analiza, desde el punto de vista preventivo, la distribución de la salud y la enfermedad en los grupos sociales, así como los factores que determinan su frecuencia y distribución en la población.

Equipo de protección individual (EPI): Cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador, para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin.

Equipos de trabajo: Cualquier máquina, aparato, instrumento o instalación utilizada en el trabajo.

Estrés Oxidativo: Es un proceso causado por un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la capacidad del sistema biológico para contrarrestarlo. Estas especies dañan a todos los componentes de la célula, incluyendo proteínas, lípidos y ADN.

Evaluación de riesgos: Proceso dirigido a estimar la magnitud de los riesgos que no hayan podido evitarse, lo que proporcionará la información necesaria para que el empresario tome las decisiones más adecuadas sobre la adopción de medidas preventivas.

Factor de Riesgo: Dícese de todo aquello que pueda materializarse en un accidente.

Fullereno: Es una de las formas alotrópicas del carbono que existe. El fullereno más conocido es el buckminsterfullereno, formado por 60 átomos de carbono (C60), en el que ninguno de los pentágonos comparten lados.

Grafeno: Lámina monoatómica bidimensional constituida por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal que posee extraordinarias propiedades como elevada conductividad eléctrica y térmica, dureza mayor que la del acero además de ser flexible.

Microscopia de Efecto Túnel: Es un instrumento que se basa en el efecto túnel, que consiste en que al acercar una punta conductora muy cerca de la superficie de la muestra a examinar, una diferencia de potencial aplicada entre las dos permite a los electrones pasar al otro lado mediante efecto túnel a través del vacío entre ellas.

Microscopía de Fuerza Atómica: Es un instrumento mecano-óptico caracterizado por su carácter no destructivo de interacción con la muestra y la posibilidad de trabajar en condiciones normales. Consta (básicamente) de una punta, un vástago y un fotodetector. El principio básico de este microscopio son las interacciones de corto alcance (atractivas o repulsivas) entre la superficie de la muestra y una punta (dip). Al desplazar esa punta las diferentes interacciones entre muestra y punta provocan la deflexión del vástago. Estas variaciones las detecta un fotodetector acoplado.

Microscopia Electrónica: La microscopia electrónica de barrido es un instrumento que permite la visualización y caracterización superficial de materiales tanto inorgánicos como orgánicos. Se trata de una técnica no destructiva que consiste en el bombardeo de una superficie con electrones acelerados que se generan sometiendo un filamento de wolframio a un alto voltaje y a alta temperatura. Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra se pueden producir varios fenómenos; una parte de los electrones son dispersados por la muestra, otros intercambian energía con ella provocando la eyección de electrones (electrones secundarios) y, en algunas ocasiones, puede producirse emisión de Rayos X. La forma más habitual de obtener las imágenes, que es la utilizada en este trabajo, es analizando la intensidad de los electrones secundarios.

Nanocomposite: Son mezclas formadas por, al menos, dos componentes. Uno de ellos se denomina “refuerzo” y está formado por material nanométrico. El segundo componente se denomina de “adhesión” y tiene como finalidad mantener unido el material de refuerzo. En el proceso de mezclado se pretende producir un proceso

sinérgico en el que se obtiene un material con mejores propiedades de las que presentan los materiales de partida.

Nanomaterial: Aquel material que presenta un tamaño comprendido entre 1 y 100 nm (nanómetros) en al menos una de las tres dimensiones.

Nanotecnología: Es la ciencia encargada de la observación, manipulación y obtención de materiales a escala nanométrica.

Nanotubos de Carbono: Es una forma alotrópica del carbono que consiste en una estructura tubular con un diámetro del orden de unos pocos nanómetros. Pueden ser simples (un único tubo) o múltiples (varios tubos concéntricos).

Peligro: Fuente o situación con capacidad de daño en términos de lesiones, daños a la propiedad, daños al medio ambiente o una combinación de ambos.

Prevención: Conjunto de actividades o medidas adoptadas o previstas en todas las fases de la actividad de la empresa, con el fin de evitar o disminuir los riesgos derivados del trabajo.

Protección: Se trata de una técnica de actuación sobre las consecuencias perjudiciales que un peligro puede producir sobre una persona, colectivo o su entorno, provocando daños.

Quantum Dots (Puntos Cuánticos): Son nanocristales con un tamaño comprendido entre 1 nm y 10 nm de diámetro de materiales semiconductores (As, Cd, Se, Tl...) que poseen propiedades ópticas únicas debido a efectos cuánticos. La luz emitida puede ajustarse en función de la dimensión de la nanopartícula.

Tóxicos: Son aquellas sustancias cuya emisión o liberación al ambiente puede llegar a ocasionar daños en la salud de los seres humanos o a cualquier forma de vida.

Vías de Penetración: Las sustancias o materiales pueden penetrar en el cuerpo humano por varias vías: inhalatoria, digestiva, dérmica y parenteral.

Folleto Divulgativo sobre Nanotecnología

Principios de Seguridad



Protección Personal



Medidas Técnicas



Medidas Organizativas

Nuevos Retos en PRL

- Aumento de la inversión en investigación de los riesgos que conlleva la exposición a medio y largo plazo a Nanomateriales.
- Colaboración Internacional en la generación de datos de interés toxicológicos.
- Reforzar y endurecer las normativas vigentes ante el desconocimiento del efecto de los Nanomateriales en la salud humana.



**Junta de
Castilla y León**

Consejería de Economía y Empleo
Dirección General de Trabajo
y Prevención de Riesgos Laborales

**Centro de Seguridad y Salud Laboral de
Castilla y León**

Avda. de Portugal s/n – 24009 - León

Tlfno. 987 34 40 32 Fax 987 34 40 33

Autor: Rubén Sánchez Hidalgo

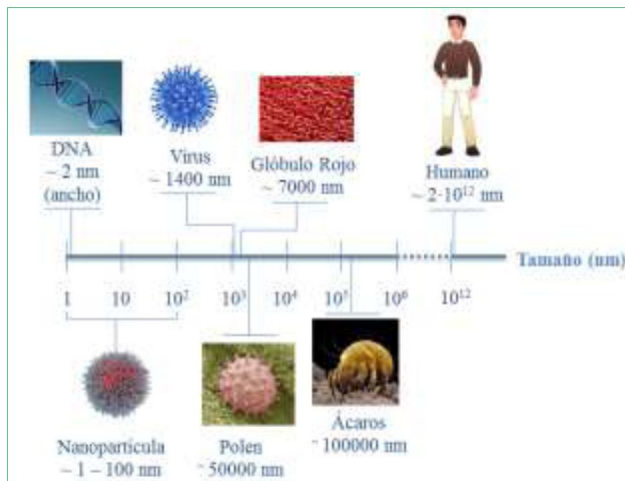
Implicación e Influencia de las Nanotecnologías y los Nanomateriales en PRL

Nuevos Retos en
Prevención de Riesgos Laborales

¿Qué es la Nanotecnología?

Es la **Ciencia** dedicada a la **Observación, Manipulación y Obtención** de Materiales a escala **Nanométrica**.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$



Nanomateriales

Materiales con un tamaño comprendido entre **1 y 100 nm** en al menos **una de las tres dimensiones posibles**.

Clasificación Nanomateriales

Basados en Carbono
Fullerenos, Nanotubos de Carbono y Grafeno



Metálicos
Plata, Oro, Óxido de Silicio, Óxido de Titanio...



Dendrímeros



Nanocomposites
Orgánicos e Inorgánicos



Aplicaciones



Nanorriesgos



Riesgo de Incendio o Explosión

Carcinogenicidad

Mutagenicidad

Toxicidad

Vías de Exposición



Respiratoria



Digestiva



Dérmica



Parenteral