

Formación continuada

Nanotecnología, nanopartículas y toxicidad

Autores

Redacción

Introducción

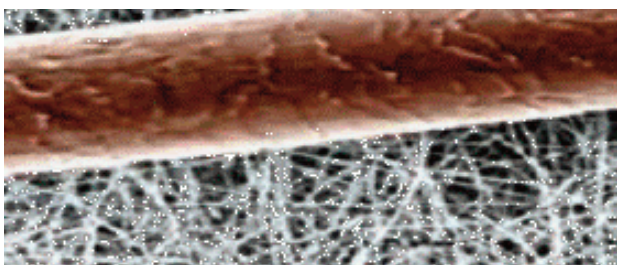
En 1959 el físico Richard Feynman declaró que las leyes de la física permitían la manipulación y el control de la posición de átomos y moléculas de manera individual, similar a los bloques de construcción de tipo Lego, y que esta posibilidad abría la puerta a un nuevo mundo “infinitamente pequeño” denominado más tarde nanomundo o nanociencia.

A continuación se exponen una serie de conceptos de interés:

Nanotecnología: consiste en el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas mediante el control del tamaño y la forma a una escala nanométrica (10⁻⁹ metros).

Nanómetro: unidad de longitud equivalente a una milonésima de milímetro (10⁻⁹ m). Su símbolo es nm.

Figura 1. Imagen de un cabello humano vista al microscopio. Su diámetro es de 80.000 nm



Nanociencia: es el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala atómica, molecular y macromolecular.

Nanoescala: tener una o más dimensiones del orden de 100 nm o menos.

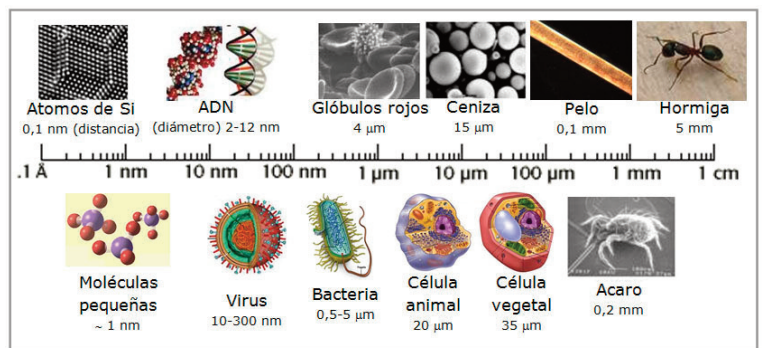
Nanopartícula: partículas con una o más dimensiones del orden de 100 nm o menos.

Nanomateriales: material con una o más dimensiones externas o una estructura interna a nanoescala.

Nanoestructura: estructura con una o más dimensiones en la nanoescala.

Nanocompuestos: compuestos en los que al menos una de las fases tiene una dimensión de la nanoescala.

Figura 2. Escala nanométrica



En el mundo natural hay muchos ejemplos de estructuras que existen con las dimensiones del nanómetro, como son las moléculas esenciales del cuerpo humano (ADN, proteínas, fosfolípidos, lípidos, células, etc.), los componentes de los alimentos, virus, etc., aunque sólo desde este último cuarto de siglo ha sido posible, de manera deliberada, modificar las moléculas y estructuras dentro de este rango de tamaño.

Según el origen de las nanopartículas, éstas pueden clasificarse en:

1. Nanopartículas de origen natural. Algunas son de origen biológico como virus, bacterias, etc., y otras son de origen mineral o medioambiental como el polvo de la arena del desierto, nieblas y humos derivados de la actividad volcánica o de los fuegos forestales, etc.

2. Nanopartículas generadas por la actividad humana. Pueden ser generadas de dos formas:

a) De manera involuntaria: aquellas producidas en ciertos procesos industriales como por ejemplo pirolisis, combustión de diesel o carbón, obtención de pigmentos, libe-

radas en barbacoas o por el calentamiento de aceites, etc.
b) De manera deliberada: a través de las llamadas nanotecnologías. Son ejemplos de ellas las nanopartículas derivadas de la arcilla para reforzar y aumentar la resistencia del plástico, las utilizadas en la fabricación de resinas para acabados del exterior de vehículos, y las que modifican propiedades ópticas de algunos materiales que se utilizan en cosmética.

Clasificación

En función del número de dimensiones a escala nanométrica, los nanomateriales se pueden clasificar en:

- o Tres dimensiones a escala nanométrica: nanocristales, fullerenos y puntos cuánticos.
- o Dos dimensiones a escala nanométrica: nanotubos y los nanohilos.
- o Una dimensión a escala nanométrica: estructuras que se utilizan en los recubrimientos de superficies o películas finas en los que sólo su grosor es de orden nanométrico.

Fullerenos

Son estructuras cerradas formadas por átomos de carbono dispuestos en forma de pentágonos y hexágonos a modo de “nanobalones” de fútbol. Entre sus propiedades físicas destaca que son capaces de resistir presiones extremas y recuperar su forma original cuando cesa la presión. Se usan como lubricantes, catalizadores, semiconductores, industria farmacológica, etc.

Puntos cuánticos

Son un conjunto de materiales entre los 2 a 10 nm, que pueden estar compuestos de metales, óxidos metálicos o materiales semiconductores, que ofrecen propiedades electrónicas, ópticas, magnéticas y catalíticas. Una característica principal de los puntos cuánticos es la capacidad que tienen para dar lugar a diferentes colores de luz, los cuales se logran modificando el tamaño de los nanocristales individuales. Esta propiedad permite que se utilicen en técnicas para el marcado fluorescente en aplicaciones biomédicas.

Nanotubos de carbono

Pueden describirse como un tubo cuya pared es una malla de agujeros hexagonales. Son muy destacables sus propiedades eléctricas y mecánicas. Son grandes superconductores, capaces de resistir el paso de corrientes elevadísimas, de densidades de corriente de hasta mil millones de amperios por metro cuadrado, y, por otra parte

su resistencia mecánica, es sesenta veces superior al acero; a su vez son ligeros y flexibles, ya que su peso específico es más de seis veces inferior a la de los mencionados aceros. También es de destacar la estabilidad de sus propiedades térmicas y químicas.

Los nanotubos forman parte de las pantallas de televisión sustituyendo a las actuales de LCD, dando lugar a mejores resoluciones y calidad de imagen, basándose en la propiedad de los nanotubos de emitir luz.

Nanohilos

Son también estructuras alargadas que destacan por sus propiedades como conductores o semiconductores. Se han obtenido de diversos materiales como silicio, cobalto, oro y cobre. Sus aplicaciones más importantes pertenecen al campo de la nanoelectrónica.

Grafeno

En el grafeno los átomos de carbono se unen en láminas planas de un átomo de espesor, formando un panel de abejas hexagonal (con un átomo en cada vértice). El grafeno es un semiconductor que puede operar a escala nanométrica y a temperatura ambiente, con propiedades que ningún otro semiconductor ofrece.

Nanoespumas de carbono

Son estructuras sólidas formadas por grupos de átomos de carbono, cuyo tamaño no excede los 10 nm, ligados entre ellos de manera aleatoria resultando un conglomerado ligero y esponjoso, entre cuyas características destaca la de tener propiedades magnéticas temporales.

Aplicaciones y usos de la nanotecnología

Las nanopartículas pueden contribuir a la obtención de superficies y sistemas más fuertes, más ligeros, más limpios y más “inteligentes”. Se indican alguno de los sectores involucrados en la fabricación y uso de las nanopartículas, nanotubos, nanocompuestos, etc., y por lo tanto, donde los trabajadores podrían estar expuestos a nanopartículas.



Tabla 1. Aplicaciones y usos de la nanotecnología

SECTOR DE ACTIVIDAD	EJEMPLOS DE APLICACIONES ACTUALES Y PROPUESTAS
Automoción, aeronáutica	Materiales reforzados, más ligeros; pinturas más brillantes, con efectos de color; resistentes a arañazos, anticorrosivas y anti-incrustantes; aditivos para diesel que permiten una mejor combustión; neumáticos más duraderos y reciclables.
Electrónica y comunicación	Memorias de alta densidad y procesadores miniaturizados, células solares, tecnología inalámbrica, pantallas planas.
Química y materiales	Pinturas anticorrosión e ignífugas, catalizadores, textiles con recubrimientos antibacterianos y ultraresistentes. Materiales más ligeros y resistentes.
Farmacia, biomedicina y biotecnología	Medicamentos a medida liberados en órganos específicos, kits de autodiagnóstico, biosensores, prótesis, implantes.
Cosmética	Cremas solares transparentes, nanoesferas con antioxidantes.
Salud	Dispositivos de diagnóstico y detección miniaturizados, destrucción de tumores por calor; terapia génica, microcirugía y medicina reparadora: nano implantes y prótesis, membranas para diálisis.
Energía	Generación de energía fotovoltaica, nuevos tipos de baterías, ventanas inteligentes, materiales aislante más eficaces.
Medio ambiente y ecología	Disminución de las emisiones de CO ₂ , producción de agua ultrapura a partir de agua de mar; pesticidas y fertilizantes más eficaces y menos dañinos, sensores para la limpieza del medio ambiente.
Defensa	Sistemas de vigilancia miniaturizados, sistemas de orientación más precisos.
Alimentación	Envases con propiedades antimicrobianas, detección de contaminantes patógenos, envases interactivos con sensores, etc. Liberar de forma controlada nuevos aromas o sabores mediante nanocapsulas, conservantes más eficaces, potenciadores de sabor, etc.



Riesgo de exposición a nanopartículas

Hay dos tipos de exposiciones ocupacionales:

a) Procesos cuyo objetivo no es la producción de nano-objetos ni la aplicación de éstos, pero durante dichos procesos se pueden generar partículas ultrafinas (PUF). Las PUF son emitidas involuntariamente en algunos procesos industriales, especialmente durante los procesos mecánicos y térmicos o durante la combustión.

Tabla 2. Fuentes de emisión secundaria de PUF

FUENTES POTENCIALES DE EMISIONES SECUNDARIAS DE PUF	
Tipo de proceso	Ejemplo de fuentes de emisión
Procesos térmicos	<ul style="list-style-type: none"> • Fundición y refinado de metales (acero, aluminio, hierro, etc.). • Galvanización, etc. • Soldadura, corte de metal (láser, térmico, etc.), humos de vulcanización, humos de negro de carbono. • Tratamientos térmicos de superficies (láser, proyección térmica, etc.). • Aplicación de resinas, ceras, etc.
Procesos mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Mecanizado. • Lijado. • Perforación. • Pulido.
Combustión	<ul style="list-style-type: none"> • Emisiones de motor diesel, gasolina o gas. • Plantas de incineración, cremación. • Ahumado de alimentos. • Calefacción de gas.
Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Polvo generado en los procesos de manipulación de pinturas, pigmentos, fabricación de cemento, etc.

b) La exposición durante la fabricación y el uso intencional de nano-objetos y nanomateriales: Nanopartículas generadas deliberadamente mediante las nanotecnologías. En este caso la exposición se puede dar en todas las etapas de producción. Desde la recepción y almacenamiento de materias primas hasta el envasado y transporte de productos terminados.

Tabla 3. Fuentes de exposición ocupacional a nanomateriales

FUENTES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL A NANOMATERIALES
<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación, manipulación, traslado, embalaje y almacenaje de productos. • Limpieza, conservación y mantenimiento de equipos e instalaciones. • Tratamiento de residuos. • Operaciones con nanomateriales (corte, pulido, mecanizado,...).



Toxicidad de la nanopartículas

Las propiedades de los nanomateriales, tales como el área de la superficie, composición química, tamaño, forma o carga, tienen una influencia importante en sus propiedades toxicológicas. Por tanto, estos nanomateriales pueden ser igual o más perjudiciales que las partículas o fibras de escala no nanométrica del mismo material.

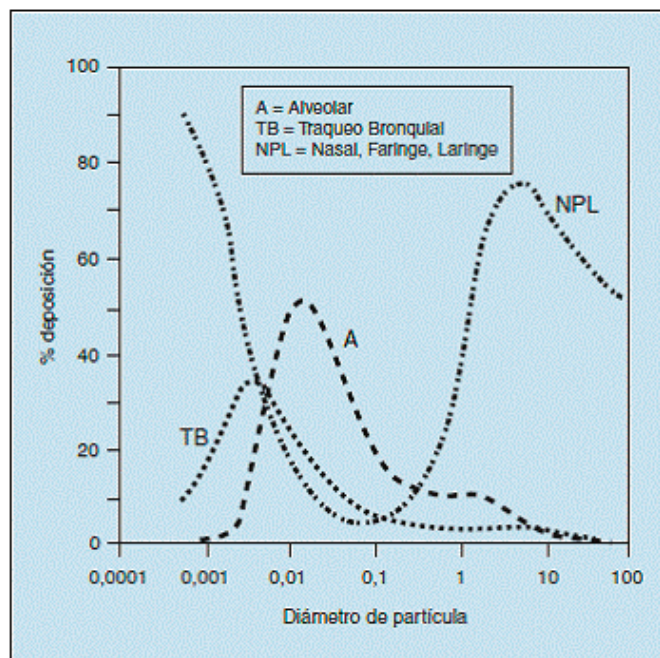
La vía entrada más común es la vía inhalatoria, especialmente si se trata de un material poco soluble, aunque no hay que descartar la dérmica y la ingestión.

Vía inhalatoria

Los nanomateriales inhalados, dependiendo de su tamaño, forma y composición química, son capaces de penetrar y depositarse en los diferentes compartimentos del aparato respiratorio, en la región extratorácica incluyendo la boca, fosas nasales, la laringe y la faringe; la región traqueobronquial; y la región alveolar que comprende los bronquiolos y los alvéolos.

Las partículas de alrededor de 300 nm son las que se depositan menos. A partir de este valor la deposición crece de manera significativa siendo la difusión el fenómeno predominante. Las PUF superiores a 10 nm se depositan mayoritariamente en la región alveolar y las inferiores a 10 nm se depositan principalmente en la región extratorácica y en una menor cantidad en la región traqueobronquial.

Figura 3. Fracciones de entrada por vía inhalatoria de las nanopartículas



Vía dérmica

No se han descrito efectos específicos para la salud relacionados con la exposición dérmica a PUF, aunque hay estudios que sugieren que este tipo de partículas pueden penetrar a través de los folículos pilosos, donde los constituyentes de las partículas pueden disolverse en condiciones acuosas y penetrar a través de la piel. Por otro lado, hay que tener en cuenta que, dado que la penetración directa a través de la piel ha estado descrita para partículas con un diámetro de 1000 nm (1 µm), es razonable pensar que las nanopartículas penetrarán con mayor facilidad.

Vía digestiva

Tampoco se han descrito efectos específicos para la salud relacionados con la ingestión de nanopartículas debido a malas prácticas higiénicas durante el manejo de nanomateriales o también a través de la deglución de las retenidas en las vías altas de sistema respiratorio.

Efectos para la salud

Los riesgos potenciales para la salud de una sustancia están asociados a la magnitud y duración de la exposición,



a la persistencia del material en el organismo, a la toxicidad intrínseca del material y a la susceptibilidad o estado de salud de la persona.

Dado que la nanotecnología es un campo emergente, existe incertidumbre sobre los riesgos de los nanomateriales manufacturados sobre la salud de los trabajadores. Aunque se podría indicar en términos generales, y según los estudios epidemiológicos, en animales y en cultivos celulares realizados que la exposición a nanopartículas se relaciona con procesos o respuestas inflamatorias (que en algunos casos puede ser una respuesta inflamatoria generalizada, inflamación aguda, inflamación pulmonar, etc.), formación de especímenes reactivos con el oxígeno que pueden dar lugar a estrés oxidativo celular y daño tisular. Todo ello parece estar relacionado con la mayor actividad biológica de las nanopartículas inducida por sus propiedades o características físicas y químicas: tamaño, área superficial, solubilidad, forma, estructura cristalina, carga, actividad catalítica y química.

Por ejemplo, estudios epidemiológicos realizados en trabajadores expuestos a aerosoles, incluyendo partículas finas y nanopartículas, muestran disminución de la función pulmonar, síntomas respiratorios adversos, enfermedad pulmonar obstructiva crónica y fibrosis.

Otros estudios en animales y en cultivos celulares manifiestan que los nanotubos de carbono de pared sencilla producen efectos adversos como inflamación aguda, inicio precoz y progresivo de fibrosis y granulomas pulmonares. Los nanotubos de carbono dada la extremada relación longitud/diámetro de los nanotubos individuales, junto con su baja solubilidad potencial en los pulmones podría conducir a mecanismos tóxicos análogos a los observados en otras partículas fibrosas como el amianto y las fibras de vidrio sintéticas. Sin embargo, a diferencia del amianto, los nanotubos de carbono de pared simple rara vez se encuentran como fibras sueltas, ya que se producen normalmente como haces enrevesados de nanotubos de diámetro entre 20 y 50 nm que forman grupos complejos y aglomerados (de tamaño entre 100 micras y 1 mm) con otras nanocuerdas y carbonosos que estén presentes, por lo que de momento no hay razones que sugieran que los nanotubos deban tratarse como las fibras de amianto a la hora de evaluar la exposición a ellos.

También, algunos estudios han encontrado niveles elevados de cáncer de pulmón entre trabajadores expuestos a ciertas nanopartículas (por ejemplo, partículas emitidas por motores diesel y humos de soldadura).

Por otra parte, estudios epidemiológicos en la población general han mostrado relación entre la contaminación del aire por partículas y el aumento de la morbilidad

y mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Evaluación y caracterización de la exposición

Para caracterizar la exposición laboral a nanopartículas, se deberán seguir los siguientes pasos:

1. Determinar el tipo de proceso donde puedan existir nanopartículas (procesos a altas temperaturas, combustión, procesos mecánicos, manipulación de nanopartículas, nanotecnología, etc.).
2. Identificar las fuentes de emisión principales.
3. Definir la toxicidad.
4. Determinar la exposición/concentración en el ambiente.

Se puede caracterizar la exposición en términos de masa, área superficial y número (en masa existe el problema de que no se llegue al límite de detección del equipo de medición). La medición de la exposición a nanoaerosoles, únicamente en términos de concentración en masa, no es suficiente para evaluar el riesgo potencial para la salud.

Prevención

La acción preventiva frente a los riesgos derivados de las nanopartículas aborda dos aspectos: la prevención de incendios y explosiones, que se deriva de su condición de partículas materiales en el ambiente de trabajo; y la vinculada a su posible toxicidad.

Las medidas de prevención y protección se establecen a partir de la evaluación de riesgos y en muchos casos serán las mismas que las que se podrían utilizar para el control de la exposición a aerosoles.

Entre las medidas técnicas se encuentran:

- a) Sustitución de las sustancias, procesos y equipos.
- b) Aislamiento o encerramiento del proceso.
- c) Extracción localizada. Para los nanomateriales, las especificaciones y la calidad de estos sistemas de extracción deben ser similares a aquellos que se utilicen para gases, vapores y aerosoles (con filtro de partículas de alta eficiencia HEPA, ULPA o SULPA). Las operaciones de limpieza deben realizarse mediante aspiración.
- d) Recirculación del aire y filtración. Debe tenerse en cuenta que los filtros HEPA presentan una eficacia superior al 99,97% para partículas de un tamaño medio de 0,3 µm, los filtros ULPA presentan una eficiencia de 99,999% y los SULPA de 99,9999%.



Tabla 4. Evaluación de la exposición a nanopartículas

Medidas	Equipos	Observaciones
Masa directamente	Muestreadores estáticos selectivos, por tamaño de partícula.	Los únicos equipos que ofrecen un punto de corte en torno a 100 nm son los impactadores de cascada (impactadores de baja presión tipo Berner, o impactadores de microorificios). Permiten el análisis químico y gravimétrico de muestras, en etapas, por debajo de los 100 nm.
	TEOM®	Los monitores sensibles, en tiempo real, tales como la Microbalanza Oscilante de Elemento Cónico (<i>Tapered Element Oscillating Microbalance - TEOM</i>) podrían utilizarse para medir on-line la concentración másica de nanoaerosoles, con una entrada selectiva adecuada de tamaño.
Masa mediante cálculo	ELPI™	Detección en tiempo real de concentración en área superficial activa, por tamaño de partícula (diámetro aerodinámico), dando la distribución por tamaños del aerosol. La concentración másica del aerosol solo puede calcularse si se conocen o suponen la carga y la densidad de partículas. Las muestras seleccionadas por tamaño pueden analizarse después <i>offline</i> (como anteriormente).
	DMAS	Detección en tiempo real de concentración en número, por tamaño de partícula (diámetro de movilidad), dando la distribución por tamaños del aerosol. La concentración másica del aerosol solo puede calcularse si se conocen o suponen la carga y la densidad de partículas.
Área superficial mediante cálculo	DMAS	Detección en tiempo real de concentración en número, por tamaño de partícula (diámetro de movilidad). Los datos pueden expresarse como área superficial del aerosol en ciertas circunstancias. Por ejemplo, se conoce que el diámetro de movilidad de aglomerados abiertos se correlaciona bien con el área superficial proyectada.
	DMAS y ELPI™ usados en paralelo	Las diferencias entre los diámetros aerodinámicos y de movilidad medidos pueden utilizarse para inferir la dimensión fractal, que puede utilizarse después para estimar el área superficial.

Referencias

- La seguridad y salud en la exposición a nanopartículas. Instituto Riojano de Salud Laboral. 2011
- NTP 797. Riesgos asociados a la nanotecnología. INSTH. 2008
- Tinkless et al. Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. 2003. Environ Health Perspect 111(9):1202-1208.
- Aitkenrj, Creelyks, Trancel. Nanoparticles: an occupational hygiene review. Research Report 274, UK Health and Safety Executive www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr274.htm.
- Les nanomatériaux. INRS. France. 2012

