

Nanopartículas: ¿un riesgo pequeño?

Celia Tanarro Gozalo y Virginia Gálvez Pérez

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. Madrid. INSHT

El rápido desarrollo de la nanotecnología ha dado lugar a la aparición de un gran número de productos de consumo que contienen nanopartículas dada la mejora en las propiedades del producto final que supone su utilización. Como consecuencia, un número cada vez mayor de trabajadores está expuesto a nuevos materiales de características toxicológicas poco conocidas. No es pues de extrañar que las nanopartículas estén consideradas como uno de los riesgos emergentes más importantes en los ambientes laborales europeos.

Introducción

La nanotecnología puede definirse como el diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas mediante el control de la forma y el tamaño en la nanoescala (tener al menos una dimensión del orden de los 100 nm o menos) ^[1]. Para hacerse una idea del tamaño, un cabello humano tiene un tamaño de unos 10.000 a 100.000 nm y una molécula de DNA tiene un diámetro de unos 2 nm.

La **nanotecnología** tiene repercusiones de gran alcance para la sociedad. En la actualidad ya se utiliza en sectores como el de la información y las comunicaciones. También se emplea en cosméticos, protectores solares, textiles, revestimientos, algunas tecnologías alimentarias y energéticas o en determinados productos sanitarios y fármacos.

En la **ciencia de los materiales**, las **nanopartículas** permiten la fabricación de productos con propiedades mecánicas nuevas, incluso en términos de su-

perficie de rozamiento, de resistencia al desgaste y de adherencia.

En **biología y medicina**, los **nanomateriales** se emplean en la mejora del diseño de fármacos y su administración dirigida y también se están desarrollando nanomateriales para instrumental y equipos analíticos. Los nuevos sistemas de administración dirigida de medicamentos, por ejemplo, han conseguido llevar e introducir nanopartículas al interior de células cancerosas para su tratamiento, mediante calor. Las mismas propiedades que hacen que las nanopartículas puedan ser útiles para el transporte de fármacos a sitios específicos del organismo las hacen peligrosas para los trabajadores expuestos.

En **tecnologías de la información** cabe mencionar los sistemas de almacenamiento de datos de muy alta densidad de registro y las nuevas tecnologías de visualización a base de plásticos flexibles.

Productos de consumo tales como cosméticos, protectores solares, fibras,

textiles, tintes y pinturas ya incorporan nanopartículas. Ejemplo de ello son los protectores solares y los maquillajes que contienen nanopartículas de TiO₂.

Dado su enorme campo de aplicación, la investigación llevada a cabo y las industrias especializadas en la fabricación de este tipo de materiales crece diariamente.

Sin embargo, las **nanopartículas** tienen propiedades y efectos muy diferentes a los de los mismos materiales en tamaños convencionales, lo que puede plantear riesgos desconocidos para la salud del hombre y de otras especies. De hecho, es posible que los mecanismos de defensa del hombre no consigan reaccionar adecuadamente ante la presencia de dichas partículas, ya que poseen características completamente desconocidas para estos mecanismos de defensa.

Esta situación supone un reto para los profesionales dedicados a la seguridad y salud en el trabajo, que deben enfrentarse a la protección de un número cada



Los nanocubos pueden almacenar gases de alta energía.

vez mayor de trabajadores expuestos a gran número de materiales diferentes de características toxicológicas poco conocidas. Así lo reconoce el informe de la Agencia Europea "Priorities for occupational health research in the EU-25"^[2], en el que se consideran las nanopartículas como uno de los riesgos emergentes más importantes en los ambientes laborales europeos. Dicho informe destaca además la falta de información disponible sobre rutas de exposición, niveles potenciales de exposición y toxicidad.

El gran reto legislativo consiste ahora en encontrar la manera de asegurar la protección de la salud, no solo de los trabajadores que están expuestos a nanopartículas, sino de la población en general y la seguridad del medio ambiente. En la actualidad mucha de la normativa que hay vigente se puede aplicar a las nanopartículas, pero esta legislación se tendrá que adaptar a las nuevas informaciones y descubrimientos que vayan apareciendo sobre las mismas, como por ejemplo el establecimiento de valores límite ambientales. El reglamento REACH no hace una

mención específica a las nanopartículas pero la definición de sustancias que aparece en dicho reglamento sí que engloba a los nanomateriales^[3].

En cualquier caso, la Ley de Prevención de Riesgos Laborales obliga a los empresarios a tomar las medidas necesarias para garantizar la seguridad y la salud de sus empleados. Además, la introducción en la empresa de nuevas tecnologías implica una consulta previa a los trabajadores o sus representantes así como una reevaluación de los puestos de trabajo que se vean afectados.

La mayor parte de las publicaciones coinciden en la necesidad de mejorar el conocimiento en los siguientes ámbitos:

- Nomenclatura y terminología.
- Métodos adecuados para evaluar y medir la exposición en lugares de trabajo.
- Exposiciones reales en lugares de trabajo.
- Evaluación de los sistemas de control (protección personal, ventilación, etc.).

- Riesgos asociados a las nanopartículas para realizar una evaluación del riesgo adecuada.

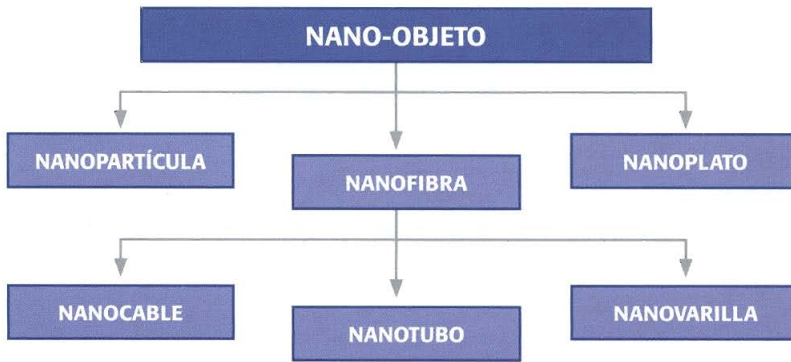
El presente artículo pretende dar una idea general sobre la presencia de las nanopartículas en los lugares de trabajo, los riesgos asociados a la misma, las posibilidades actuales de evaluación de riesgos y las medidas preventivas aplicables, con los limitados conocimientos que se tienen hasta la fecha.

Definiciones y terminología

Como se ha señalado anteriormente, es necesario realizar un esfuerzo para normalizar la terminología aplicada en este campo, por ello, los organismos de normalización europeos, nacionales e internacionales han creado los siguientes comités dedicados a esta materia:

- ISO TC229 "nanotechnologies"
- CEN TC 352 "nanotechnologies"
- AEN/ GET 15 "nanotechnologies"

■ Figura 1 ■ Clasificación de las NP según la ISO TS 27687



Nano-objeto: material cuyas dimensiones externas o estructura interna se hallan en la nanoescala (escala nanométrica), y que puede mostrar características nuevas comparadas con las del mismo material fuera de la nanoescala.

Nanopartícula: nano-objeto con las tres dimensiones en la escala nano.

Nanoplato: nano-objeto con una dimensión en escala nano y otras dos significativamente más largas.

Nanofibra: nano-objeto con dos dimensiones en escala nano y la otra significativamente más larga.

Nanotubo: nanofibra hueca.

Nanocable: nanofibra conductora o semiconductora de la corriente.

Nanovarilla: nanofibra sólida y recta.

Los citados comités, además de otros grupos de normalización con competencia en la materia, han empezado a publicar normas y otros documentos tanto de terminología básica como de evaluación de la exposición.

Entre los documentos publicados, está el informe Técnico ISO TR 27628 ^[4] que define nanopartícula y partículas ultrafinas como: partículas con un diámetro nominal menor de 100 nm, pero hace notar que el término "ultrafino" suele aplicarse a partículas generadas de manera secundaria en procesos, como humos de combustión y humos de soldadura.

En este artículo se utilizará el término "nanopartícula" (NP) para referirse a materiales diseñados con el fin de tener unas propiedades específicas como los nanotubos de carbono, los nanocables, etc. lo que se correspondería con el término inglés "engineered nanoparticle". El resto de partículas en ese rango de tamaño, pero que no se han fabricado expresamente, se denominarán con el término "ultrafino".

La especificación técnica ISO TS 27687^[5] clasifica las NP según la Figura 1.

Las nanopartículas pueden agruparse para formar estructuras más grandes que se denominan agregados o aglomerados. En los aglomerados la unión entre las nanopartículas se realiza mediante fuerzas relativamente débiles como los enlaces de tipo Van der Waals, por fuerzas electrostáticas o de tensión superficial. En cambio en los agregados las uniones entre las partículas se producen con enlaces más fuertes que dificultan su redispersión por medios mecánicos. En los aglomerados la superficie específica resultante es similar a la suma de la superficie específica de los componentes por separado. En cambio en los agregados la superficie específica que se forma es menor que la suma de las superficies específicas de los componentes que se unen^[5].

Si los clasificamos por su forma, dentro de los nanomateriales más utilizados están:

- **Nanotubos de carbono:** nanotubo compuesto por una o varias láminas

de grafeno (grafito bidimensional) enrolladas formando un tubo sin costuras, de pared sencilla o de pared múltiple. Pueden tratarse de un nanotubo de pared sencilla (SWCNT), compuesto por una única capa de átomos de carbono dispuesta en forma cilíndrica, o de un nanotubo de pared múltiple (MWNT), compuesto por múltiples tubos concéntricos, de diámetros significativamente mayores que los SWCNT. Los nanotubos de carbono son excelentes conductores del calor, pueden llegar a ser 60 veces más fuertes que el acero y seis veces más ligeros^[6].

- **Nanocápsulas:** nanoestructuras esféricas huecas que pueden tener en su interior otras sustancias (enzimas, polímeros, adhesivos...). Las nanocápsulas tienen propiedades especiales como una gran solubilidad y resistencia a los jugos gástricos lo que permite dirigir los medicamentos a su punto de acción^[6].
- **Nanocables:** nanopartículas conductoras o semiconductoras con una estructura cristalina. Tienen un diámetro aproximado de una milésima de grosor de un cabello humano.
- **Fulerenos:** cajas esféricas que contienen de 28 a más de 100 átomos de carbono. El más conocido es el que tiene 60 átomos de carbono. La estructura de C_{60} es la de una figura geométrica que se asemeja a un balón de fútbol, constituido por 20 hexágonos y 12 pentágonos, con un átomo de carbono en cada una de las esquinas de los hexágonos y un enlace a lo largo de cada arista ^[6]. Los fulerenos tienen unas propiedades parecidas a los nanotubos de carbono. Los fulerenos no son muy reactivos debido a la estabilidad de los enlaces tipo grafito, y son también muy poco solubles en la mayoría de disolventes.

- **Quantum dots (QD):** partícula de dimensiones nanométricas que presenta propiedades ópticas y electrónicas dependientes de su tamaño, debido al confinamiento cuántico¹¹.

Los puntos cuánticos son nanosemiconductores que tienen estados de energía completamente cuantizados. Un QD mimetiza las propiedades básicas de un átomo, permitiendo la aplicación práctica de la física atómica en el campo de los dispositivos de semiconductores.

Toxicología de las nanopartículas o nanotoxicología

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 caso de las nanopartículas existen grandes lagunas de conocimiento en factores de gran importancia como rutas de absorción, transporte, distribución, translocación¹ e interacción con los sistemas biológicos del organismo, etc.

A pesar de esta falta de información, los estudios llevados a cabo hasta el momento parecen indicar, que la toxicidad de las nanopartículas no puede extrapolarse de los estudios toxicológicos existentes que se hicieran en partículas de escalas mayores, es decir, es muy probable que la toxicidad de una sustancia formada por partículas de una micra de diámetro difiera de la toxicidad de las partículas (de la misma sustancia) que tengan únicamente 10 nm de diámetro.

¹¹ El término "translocación" se refiere a un proceso mediante el cual las nanopartículas atraviesan barreras biológicas y pueden aparecer en otras partes del organismo distintas de las de entrada, pero manteniendo su integridad como partícula (es decir sin que se produzca disolución). Por ejemplo, llegando al cerebro a través del nervio olfativo



El motivo parece ser que cuanto más pequeña es una partícula, mayor es el porcentaje de sus átomos que se hallan en la superficie. Una gran área superficial corresponde a un alto nivel de reactividad y, en general, cuanto más reactiva sea una sustancia, más tóxica es. La toxicología a nivel "nano" no sigue los esquemas generales para los tóxicos de mayor tamaño. Hasta ahora se creía que, al aumentar la dosis de tóxico, aumentaba el efecto producido por los tóxicos, pero en algunos estudios toxicológicos (in-vivo e in-vitro) realizados hasta el momento se ha visto que esa tendencia general en algunos casos no es aplicable a las nanopartículas, debido a que mayores concentraciones de nanopartículas pueden tender a aglomerarse, lo que puede disminuir su toxicidad relativa. Esto demuestra que algunos conceptos tradicionales de la toxicología deben ser modificados para su aplicación a la nanotoxicología. Por ejemplo, propiedades como la forma, el tamaño y la estructura superficial de las nanopartículas son fac-

tores fundamentales para determinar su reactividad y toxicidad.

En cualquier caso, es importante distinguir en este ámbito los nanomateriales de las partículas ultrafinas. En ambos casos se trata de tamaños de partícula menores de 100 nm, pero las partículas ultrafinas han venido generándose en procesos ya conocidos,² como combustión de motores diésel, soldadura o fundiciones y por tanto la información de la toxicidad de dichos productos, incluso en el rango nanométrico, es mucho más completa que la que se tiene sobre los nuevos tipos de nanopartículas.

Con respecto a las nanopartículas, las principales vías de entrada evaluadas han sido la inhalatoria, la dérmica y en algunos estudios también se han dado resultados de la evaluación realizada por vía digestiva. Fundamentalmente casi todos los estudios se centran en las vías respiratorias y en concreto en el pulmón como principal órgano diana, aunque no

■ Tabla 1 ■ Ejemplos de fuentes potenciales de exposición a nanopartículas ^[4]

Tipo de proceso	Fuente
Procesos a alta temperatura	Refinado de metales – general Fundición de aluminio Fundición de hierro Galvanizado Soldadura Ranurado por fusión o combustión Corte de metal-lanza térmica Corte de metal-láser Recubrimiento en caliente por spray Encerado en caliente
Combustión	Motores diésel Motores de gasolina Motores de 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 humo Producción de TiO ₂ ultrafino Producción de sílice amorfa Producción de alumina amorfa
Manipulación	Manipulación de polvo de nanopartículas sin procesar Manipulación de depósitos de coloides secos
Nanotecnología	Producción de nanotubos de carbono Generación en fase gaseosa de nanopartículas Uso y manipulación de aerosoles de nanopartículas Sprays de suspensiones de nanopartículas, soluciones y lodos

se descarta la posibilidad de que puedan afectar a otros órganos como los riñones o el hígado^[6].

Las partículas insolubles son las más preocupantes, algunas son además capaces de atravesar las barreras de protección del cuerpo. Así, las partículas inhaladas pueden pasar a la sangre y distribuirse por el organismo, incluso algunas pueden atravesar los nervios olfativos y llegar al cerebro.

Unos de los nanomateriales más estudiados han sido los nanotubos de carbono. La posible toxicidad de estos materiales ha llamado la atención debido a sus aparentes similitudes con el amianto y otras fibras cancerígenas^[7]. Los nanotubos de carbono (tanto los sencillos como

los multicapa) pueden llegar a tener una longitud y un diámetro comparable con las fibras de amianto y todos estos factores contribuyen a la toxicidad de las fibras en los pulmones. Es el caso de algunas variedades de nanotubos, que se ha demostrado mediante estudios en animales, que se acumulan en los pulmones de manera similar a las fibras de amianto. En la práctica, existen muchas variedades de nanotubos que se diferencian en la forma, tamaño, número de capas y estructura. Esa gran variedad hace que sea más complicado el análisis de los riesgos que provocan estas nanopartículas en la salud.

Además, hay que tener en cuenta que la toxicidad es diferente en función de la composición o el tipo de material. Y

como se ha señalado anteriormente, las propiedades tóxicas pueden diferir mucho con respecto al material en un rango mayor de tamaño de partícula.

Por ejemplo el TiO₂ se considera “no tóxico” mientras que el nano-TiO₂ ha demostrado en estudios toxicológicos tener alta toxicidad pulmonar y efectos citotóxicos. Otro factor que influye en la toxicidad es la forma de la nanopartícula. Estudios in-vitro utilizando TiO₂ han demostrado que el TiO₂ con forma de fibra es más tóxico que la misma molécula con forma esférica^[8].

Está claro que los datos disponibles son limitados y se requieren estudios adicionales sobre conceptos generales de toxicología de nanopartículas, así como sobre las propiedades toxicológicas de los nuevos materiales que vayan apareciendo, para lo que sería conveniente el desarrollo de métodos para la evaluación de la toxicidad de nanomateriales sintéticos.

Exposición laboral a nanoaerosoles

Las principales fuentes de nanoaerosoles en lugares de trabajo están asociadas a la formación de partículas mediante nucleación y condensación debida a procesos a alta temperatura y a procesos mecánicos, en los que se producen de manera secundaria nanopartículas. La otra fuente principal son los procesos de producción de nanopartículas.

En la Tabla 1 se citan ejemplos de fuentes potenciales de exposición a nanopartículas.

Evaluación de la exposición

Cada vez se hace más necesario disponer de información real sobre exposi-

■ **Tabla 2** ■ Instrumentos y técnicas de medida para determinación de aerosoles [11]

ÍNDICE		EQUIPOS MEDIO	OBSERVACIONES
MASA	Directamente	Muestreadores selectivos por tamaño de partícula estáticos	Impactadores de cascada con punto de corte por debajo de 100 nm (análisis químico y gravimétrico).
		TEOM®	Tiempo real. Requiere un orificio de entrada selectivo por tamaño de partícula adecuado.
	Mediante cálculo	ELPI™	Tiempo real. Selección por diámetro aerodinámico. Concentración en área superficial activa. Para calcular la masa se necesita conocer la densidad y la carga de las partículas.
		DMAS	Tiempo real. Selección por diámetro de movilidad. Concentración en número. Para calcular la masa se necesita conocer la densidad y forma de las partículas.
NÚMERO	Directamente	CPC	Tiempo real. Selección por diámetro de movilidad. Concentración en número. Sin preseparador no son específicos del rango nanométrico.
		DMAS	Tiempo real. Selección por diámetro de movilidad. Concentración en número con distribución por tamaño de partícula.
		Microscopía electrónica	Muestreo + análisis. Pueden dar información de concentración en número para un tamaño específico.
	Mediante cálculo	ELPI™	Tiempo real. Selección por diámetro aerodinámico. Concentración en área superficial activa. Los datos se pueden interpretar en términos de concentración en número.
SUPERFICIE ACTIVA	Directamente	Cargador por difusión	Tiempo real. Área superficial activa. Es necesario un preseparador. (Incluido en equipos comerciales específicos para nanoaerosoles).
		ELPI™	Tiempo real. Selección por diámetro aerodinámico. Concentración en área superficial activa. Por encima de 100 nm el área superficial activa no es directamente proporcional al área superficial geométrica.
		Microscopía electrónica	El análisis puede dar información de área superficial con respecto al tamaño de partícula.
	Mediante cálculo	DMAS	Tiempo real. Selección por diámetro de movilidad. En determinadas circunstancias, como aglomerados , hay buena correlación .
		DMAS y ELPI™ usados en paralelo	Las diferencias entre los diámetros aerodinámicos medidos pueden utilizarse para inferir la dimensión fractal y estimar el área superficial.

ción a nanopartículas para poder comprender y controlar el riesgo asociado a dicha exposición.

El enfoque clásico a la hora de tratar las exposiciones a contaminantes en forma de aerosol era considerar las concentraciones en masa por unidad de volumen (ejemplo:mg/m³) para cada una de las fracciones (inhalable, torácica y respirable) definidas por las normas de muestreo de aerosoles^[9].

Sin embargo, los estudios toxicológicos ponen de manifiesto la importancia del área superficial en la toxicología de las nanopartículas, lo que pone en duda la validez del enfoque clásico en lo relativo a la evaluación del riesgo. Por este motivo existen en el mercado gran número de equipos que dan diferentes datos relacionados con la exposición en términos, no sólo de masa por unidad de volumen, sino también de número de partículas por unidad de volumen, área superficial, etc.

En cualquier caso, es complicado obtener datos que permitan evaluar la exposición personal de los trabajadores, debido a que el volumen de los equipos comerciales disponibles impide el muestreo personal y a la dificultad de discriminación entre las nanopartículas de fondo y aquellas procedentes de la exposición laboral.

Por ello es necesario planificar una estrategia de muestreo adecuada, dada la variación espacio – temporal de la con-

centración y la distribución por tamaño de partícula^[10] para poder relacionar el muestreo estático con la exposición personal.

Los informes técnicos ISO TR 27628^[4] e ISO TR 12885^[11] resumen los principales métodos para el muestreo de nanopartículas dividiendo los equipos en tres categorías dependiendo de la información que proporcionan:

- Masa
- Número
- Área superficial

La Tabla 2 (Página 39)^[11] resume las propiedades de los equipos actualmente disponibles y el tipo de información suministrada.

El equipo más utilizado para detectar nanopartículas es el CPC (*Condensation Particle Counter*). Otros equipos también muy utilizados y más versátiles, ya que se puede obtener a partir de ellos datos de número, masa y área superficial si se tiene conocimiento del tipo de aerosol (densidad, forma de las partículas etc.), son los SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) y los ELPI (*Electrometer Low Pressure Impactors*).

CPC (Condensation Particle Counter)

El principio de funcionamiento de un CPC es la detección óptica de las nanopartículas, cuyo tamaño se ha incrementado por condensación de un vapor sobre la nanopartícula hasta hacerla detectable por el contador óptico. El uso de CPC presenta los siguientes inconvenientes:

- La falta de información sobre la distribución de tamaño de partícula.
- El rango de medida de la mayoría de los CPC supera 1 µm por lo que para conocer la contribución de las nanopartículas es necesario bien una etapa

de separación, bien la utilización en paralelo con un equipo capaz de detectar las partículas mayores de 1 µm (o el punto de corte de interés) como un OPC (*Optical Particle Counter*) y restar a la medida del CPC la contribución de las partículas más grandes obtenida mediante la lectura del OPC^[4].

SMPS (Scanning or Stepped Mobility Particle Sizer)

El SMPS es el instrumento más utilizado para medir la distribución de tamaño de partículas de nanoaerosoles. El SMPS puede dar distribuciones de tamaño de partícula entre 3 y 800 nm (si bien para dar una distribución tan amplia se deben utilizar 2 o 3 SMPS en paralelo)^[4]^[11].

El SMPS consta de un detector que suele ser un CPC o electrómetro y un clasificador electrostático que permite la separación por tamaño de partícula. En primer lugar, las partículas pasan a través de una fuente radiactiva que confiere a las mismas un equilibrio de cargas de distribución conocida. A continuación, pasan por un campo electrostático, que separa las partículas en función de su diámetro, de esta manera sólo pasarán al contador las partículas de un determinado diámetro. Variando la diferencia de potencial entre los electrodos de manera secuencial, se van seleccionando todos los tamaños de partícula del aerosol que son contados por el detector obteniéndose la distribución por tamaño de partícula.

Las principales desventajas de los SMPS son: su precio, la complejidad de uso y la utilización de una fuente radiactiva, que en España requiere licencia. Además, el tiempo que se necesita para hacer un barrido completo del tamaño de partícula son 2-3 minutos, lo que supone una limitación en el caso de aerosoles que cambian muy rápidamente^[12], como aerosoles generados por condensación en mediciones muy cercanas a la fuente de emisión.

ELPI (Electrometer Low Pressure Impactors)

Este instrumento es capaz de proporcionar, mediante un software, distribución por tamaño de partícula y concentración en el rango entre los 7 nm y las 10 micras. El funcionamiento es el siguiente: las partículas muestreadas son cargadas mediante un cargador de corona y pasan al impactador donde cada etapa está aislada eléctricamente, la corriente eléctrica llevada a cada etapa por las partículas cargadas es medida por un electrómetro. Esta corriente es directamente proporcional al área superficial activa del aerosol. Dado que en cada etapa hay un rango estrecho de diámetros aerodinámicos de partículas y se conoce el diámetro medio, si se conoce o se puede asumir la eficacia de carga de las partículas en función de su tamaño, los datos del ELPI pueden interpretarse como distribución de número por tamaño medio de partícula. Si la forma y densidad de las partículas son

Es necesaria una estrategia adecuada para poder relacionar el muestreo estático con la exposición personal

Esquema 1 Jerarquización de las medidas de control



conocidas se puede calcular la concentración másica de aerosol^[4].

En resumen, es un equipo que es capaz de dar una medida indirecta muy rápida de la distribución por tamaño de partícula en número^[13].

Para la aplicación en el campo de las nanopartículas sólo serían útiles 9 de las 14 etapas ya que el resto son de tamaño de partícula superior a la micra. Los SMPS tienen más canales y por tanto dan mayor resolución en la distribución por tamaño de partícula, pero la respuesta del ELPI es mucho más rápida (<1 segundo)^[12].

Uno de los problemas principales es que los resultados son fiables a partir de 30nm^[13], lo que deja fuera a partículas menores de ese tamaño y otro problema es el tamaño y el peso del equipo que ronda los 35 kg.

Control de la Exposición

El control de la exposición a nanopartículas es uno de los retos a los que se enfrentan actualmente los higienistas. Dada la falta de conocimiento sobre datos toxicológicos, estudios epidemiológicos y valores de concentración ambiental (ya sea en masa, número o área superficial), debería aplicarse en cualquier caso el principio de precaución y tratar de minimizar la exposición para evitar los posibles impactos negativos. Y en cualquier caso debe intentarse aplicar las medidas por el orden propuesto en el esquema 1, sin olvidar que, si es posible, debería planificarse la prevención en la etapa de diseño:

Eliminación: esta opción es difícilmente aplicable a materiales diseñados para tener unas propiedades específicas, pero es necesario evaluar si las mejoras en las propiedades de un material determinado compensan los posibles riesgos adicionales.

Sustitución: el cambio del nanomaterial no será factible en la mayoría de los casos, pero sí puede considerarse reducir la posibilidad de exposición, por ejemplo ligando los nanomateriales a un soporte sólido o líquido.

Aislamiento/confinamiento: todas las operaciones en las que se liberen de manera intencionada nanomateriales al ambiente deberían realizarse en instalaciones confinadas o en las que los trabajadores estén aislados del material de alguna otra manera, por ejemplo mediante el uso de cabinas.

Con respecto a la protección colectiva y a la individual es necesario determinar si los métodos de control tradicionales, como la ventilación por extracción localizada y los equipos de protección individual, especialmente los de protección respiratoria, son eficaces frente a las nanopartículas^[14].

Ventilación por extracción localizada

En principio, dadas las características de las nanopartículas, los sistemas existentes de captación de partículas deberían ser capaces de captarlas con más facilidad que partículas de mayor tamaño^[15] ya que al disminuir la inercia es más

fácil que sean captadas por la corriente de aire de la extracción, si bien es posible que la facilidad de las nanopartículas de cargarse electrostáticamente pudiera influir negativamente en la captación. En teoría se considera suficiente un sistema de extracción equipado con filtro HEPA^[12], y hay estudios que lo corroboran^[16].

El diseño de la ventilación debe tener en cuenta^[17]:

- La ubicación de la extracción, lo más cercana posible a la fuente.
- La velocidad de captura adecuada para captar las nanopartículas considerando su comportamiento (similar a gas y vapor).
- El tratamiento de las emisiones antes de ser expulsadas al medio ambiente.
- La limpieza y mantenimiento regular del sistema de ventilación.

Equipos de protección

Resultados del proyecto Nanosafe 2^[18] ^[19] muestran la eficacia de distintos equipos de protección:

Los filtros fibrosos son incluso más eficaces para nanopartículas que para



partículas de mayor tamaño. Teniendo en cuenta estos datos, podría ser suficiente con una máscara autofiltrante FFP3. Sin embargo, en el caso de las NP el ajuste de la máscara es crítico para evitar la entrada de las mismas y por ello se recomienda⁽¹⁷⁾ un respirador de presión positiva equipado con filtros P100, que podrían reducirse a P95 si el riesgo se considera bajo.

Los guantes más adecuados⁽¹⁹⁾ serían los de nitrilo y para un uso continuado se recomienda utilizar dos pares⁽¹⁷⁾. Es posible utilizar otro tipo de guantes y es de especial importancia tener en cuenta que los guantes deben ser también impermeables a otro tipo de compuestos que se manejen junto con las nanopartículas como, por ejemplo, disolventes⁽¹⁷⁾.

Se recomienda que la ropa de trabajo no sea de algodón⁽¹⁸⁾, lo más adecuado sería ropa de trabajo que incluyera capu-

cha, batas de laboratorio, monos cubrezapatos, etc. de Tyvek®.

Otro problema a la hora de controlar la exposición es que no es posible, en general, realizar una evaluación cuantitativa del riesgo ya que no se ha establecido un índice de exposición (en número, masa o superficie activa) para nanopartículas; todos los métodos de medida presentan inconvenientes considerables, entre ellos, como se ha señalado anteriormente, la dificultad de realizar un muestreo personal y de discriminar las partículas de fondo de las producidas por el proceso. A esto se añade que, dado el increíble desarrollo que están teniendo este tipo de materiales, aparecen continuamente nuevas nanopartículas con propiedades toxicológicas desconocidas.

Por ello el uso de metodologías de "control banding" CB o metodologías

simplificadas de evaluación puede ser adecuado. Las primeras metodologías de CB fueron aplicadas en el campo de la higiene industrial en la industria farmacéutica y microbiológica⁽²⁰⁾ dado que en ella se desarrollaban productos nuevos de los que no se tenía suficiente información toxicológica y de los cuales muchos nunca iban a salir al mercado. El CB permite tomar decisiones sobre los niveles de control sin disponer de una información completa sobre el riesgo y la exposición⁽¹⁴⁾. Por ello podría suponer una herramienta adecuada para el control de la exposición a nanopartículas.

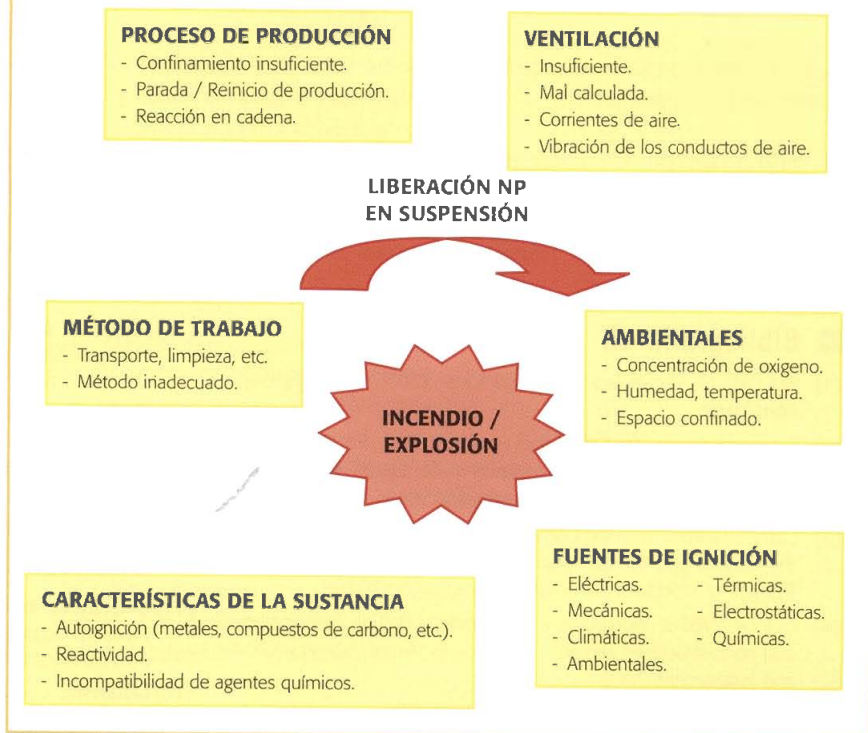
Riesgos asociados a la seguridad

En primer lugar, deben considerarse el riesgo de incendio, de explosión y de posibles efectos catalíticos al manejar nanoaerosoles⁽²¹⁾.

Aunque existe poca información sobre el riesgo de incendio y explosión asociado con partículas ultrafinas, es razonable pensar que los nanomateriales presenten un mayor riesgo que el mismo material de mayor tamaño de partícula en la misma cantidad dado el incremento de área superficial⁽¹²⁾. Esta mayor área superficial también favorece la actividad catalítica y puede traducirse en reacciones inesperadas, en algunos casos violentas o explosivas⁽²¹⁾.

La explosividad del polvo, la energía mínima de ignición y la temperatura de ignición son parámetros típicos para caracterizar los aspectos de seguridad relevantes para el polvo⁽¹¹⁾. La disminución del tamaño de partícula de materiales combustibles puede disminuir la energía mínima de ignición, aumentando la posibilidad de que materiales relativamente inertes se vuelvan combustibles. La dispersión de los materiales combustibles en aire puede presentar un riesgo mayor

■ **Figura 2** ■ Principales factores desencadenantes de incendios o explosiones



que la dispersión de macro y micromateriales con composición similar.

Cualquier polvo seco, finamente dividido y combustible en el rango de tamaño de las micras, puede presentar riesgo de explosión incendio o incluso combustión espontánea. En el caso de las nanopartículas, con mayor área superficial, las partículas se pueden cargar electrostáticamente aumentando el riesgo de ignición [22], [23]. El pequeño tamaño de las partículas hace que permanezcan en suspensión por más tiempo y puede crear nubes potencialmente explosivas.

Especialmente importante es tener en cuenta estos riesgos en el caso de nanomateriales que han sido diseñados específicamente para generar calor durante el progreso de reacciones a nanoescala [11].

El manejo de las nanopartículas combustibles en líquido, cuando sea posible, evitaría el riesgo de ignición y la maquinaria debería elegirse de modo que se prevengan igniciones y se minimice la posibilidad de producción de chispas [22], [24].

Otra posibilidad para reducir el riesgo de incendio y deflagración es evitar que el polvo permanezca en suspensión o utilizar atmósferas con gas inerte o pobres en oxígeno [21], [22].

Los procesos de producción de nanomateriales existentes actualmente pueden implicar procesos de alta energía que implican ciertos riesgos como manejo de cilindros de alta presión, aparatos de baja presión, gases inertes y gases tóxicos, objetos a altas temperaturas, corrientes eléctricas de alta intensidad, emisión de radiación electromagnética y luces de alta intensidad (visible, infrarrojo y ultravioleta) y láseres. Las actividades bajo dichas condiciones requieren la utilización de prácticas de trabajo adecuadas [11].

Conclusiones

Las nanotecnologías, debido a su diversidad de aplicaciones, experimentarán una expansión exponencial en los próximos años y su aplicación promete grandes beneficios para la sociedad.

Sin embargo, esta expansión lleva consigo la exposición, de cada vez más trabajadores, a una serie de productos de propiedades toxicológicas en muchos casos desconocidas.

Para poder determinar los beneficios de la utilización de esta nueva tecnología y los riesgos que eso conlleva, es necesario conocer más profundamente estos nuevos materiales. Muchos de estos nuevos productos o algunos de entre ellos podrían tener propiedades muy peligrosas para la salud y el medio ambiente, como ser fácilmente dispersables en el medio ambiente, ser biopersistentes o tener efectos irreversibles.

Para que no se repitan situaciones en las que las grandes posibilidades de un material o tecnología se desarrollen y se lancen al mercado y resulten a la larga tener graves consecuencias para la salud o el medio ambiente, como ha sucedido en el caso del amianto o los freones, es necesario que el desarrollo de estos nuevos materiales se realice por parte de las empresas con responsabilidad y respetando, en caso de duda, el principio de precaución, para preservar ante todo la salud de los trabajadores y de la población en general.

En concreto, en el ámbito de la seguridad y salud, para poder proteger adecuadamente a los trabajadores es necesario desarrollar métodos para evaluar la toxicidad y otras propiedades potencialmente peligrosas de las nanopartículas, así como equipos de un coste razonable que permitan medir concentraciones personales de los trabajadores expuestos a nanopartí-