

Caracterización de la exposición laboral a nanomateriales

Agurtzane Zugasti Macazaga

Luz M^a Marcos Rico

Centro Nacional de Verificación de Maquinaria. INSST

En España no se dispone de límites de exposición profesional aplicables a los nanomateriales, por lo que la evaluación de los riesgos derivados de la exposición por inhalación a los mismos no se puede llevar a cabo de manera similar a la de cualquier otro agente químico que se presente en forma de materia particulada. Este artículo presenta el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 17058, que permite, mediante mediciones de las concentraciones de los nanomateriales en el aire, caracterizar las exposiciones laborales a los mismos y ayudar en la toma de decisión sobre la posible adopción de medidas de control en el lugar de trabajo que eliminen o reduzcan el riesgo de exposición por inhalación a los nanomateriales.

INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales son materiales que contienen partículas con una o más dimensiones en la escala nanométrica, es decir: desde aproximadamente 1 nanómetro (nm) hasta 100 nanómetros. Estos materiales se caracterizan por tener propiedades únicas y diferentes a las del mismo material en escala micrométrica, permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones en diversos sectores como Medicina, Automoción, Construcción o Textil, entre otros, lo que implica que un gran número de trabajadores puede estar potencialmente expuesto a los mismos.

En la actualidad se están utilizando una gran variedad de estos materiales, tal como se recoge en el documento "[Potencial exposición a nanomateriales en](#)

[entidades de I+D+i](#)" [1]. Estos materiales presentan características fisicoquímicas y morfológicas muy diferentes entre sí. Algunos de ellos pueden tener formas esféricas, como las nanopartículas de plata, mientras que otros se presentan en forma de fibras, como los nanotubos de carbono. Incluso hay nanomateriales que, aun teniendo la misma composición química, pueden tener diferentes estructuras, como el grafeno, los nanotubos de carbono, las nanofibras de carbono o el negro de humo, confiriéndoles distintas propiedades y, por tanto, diferentes aplicaciones. Además, para un mismo nanomaterial, por ejemplo, el grafeno, puede haber diferentes tipos en función de la densidad, presentando distinta pulverulencia, lo que hace que se comporten de diferente manera una vez que están en suspensión en el aire.

Los riesgos que presentan los nanomateriales pueden estar relacionados con el tamaño, la forma o el área superficial de las partículas. Actualmente se desconocen los efectos que pudieran causar sobre la salud, por lo que se recomienda emplear el principio de precaución, es decir: se considerarán peligrosos a no ser que haya suficiente información que demuestre lo contrario.

Aunque no existe legislación específica para los nanomateriales, desde el punto de vista de la seguridad y salud en el trabajo, al igual que para cualquier agente químico, les es de aplicación el [Real Decreto 374/2001, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo](#), por lo que el empresario debe evaluar los

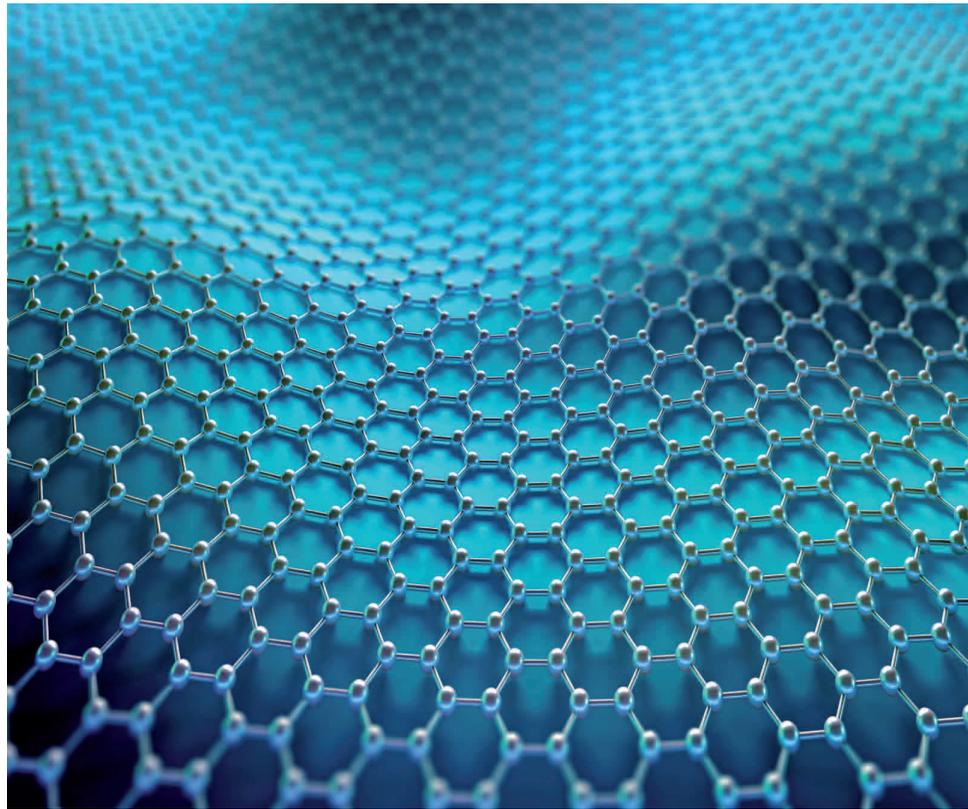
riesgos para la salud y seguridad originados por los nanomateriales, teniendo en cuenta que la evaluación de los riesgos derivados de la exposición por inhalación a un agente químico peligroso deberá incluir la medición de las concentraciones del agente en el aire, en la zona de respiración del trabajador, y su posterior comparación con el valor límite ambiental que corresponda. Este real decreto indica que las mediciones no serán, sin embargo, necesarias cuando el empresario demuestre claramente por otros medios de evaluación que se ha logrado una adecuada prevención y protección.

En España no se dispone de valores límite ambientales de obligado cumplimiento específicos para los nanomateriales, por lo que, de manera alternativa, se puede hacer uso de otros procedimientos que permitan evaluar los riesgos derivados de la exposición por inhalación a los mismos.

El objetivo de este artículo es presentar el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 17058 "Exposición en el lugar de trabajo. Evaluación de la exposición por inhalación de nano-objetos y sus aglomerados y agregados" [2], que permite caracterizar, mediante mediciones de las concentraciones de los nanomateriales en el aire, las exposiciones laborales a los mismos y ayudar en la toma de decisión sobre la adopción de medidas de control en el lugar de trabajo para eliminar o reducir el riesgo de exposición por inhalación.

MEDICIONES DE NANOMATERIALES EN LOS LUGARES DE TRABAJO

Los nanomateriales son materiales que contienen partículas, por lo que, en un principio, podría pensarse que las mediciones fueran a realizarse de manera



similar a cualquier otro agente químico que se presente en forma de materia particulada, es decir, determinando la concentración en masa de las fracciones relacionadas con la salud (inhalable, torácica y respirable), debido a que los efectos toxicológicos de las partículas se han investigado en función de este parámetro. Sin embargo, en el caso de las partículas de tamaño inferior a 100 nm, los efectos potenciales sobre la salud parece que guardan más relación con otros parámetros, como son el área superficial o el número de partículas, que con su masa. Por ello, y ante la falta de acuerdo sobre la métrica más adecuada para determinar las exposiciones a nanomateriales, la comunidad científica recomienda realizar las mediciones en diferentes métricas, como el número, el área superficial y la masa de las partículas.

Un aspecto a destacar de los nanomateriales es que las partículas individuales (primarias) que los constituyen tienden a unirse unas con otras para dar lugar a aglomerados y agregados de tamaño superior a 100 nm. Además, estos aglomera-

dos y agregados pueden unirse a otras partículas diferentes que están presentes en el lugar de trabajo, dando lugar a aglomerados de, incluso, tamaño micrométrico. Por ello, se recomienda que las mediciones de los nanomateriales no se realicen solamente en la escala nanométrica, sino que se amplíe el intervalo de tamaño hasta 10 μm [2].

Las mediciones de las exposiciones a nanomateriales se pueden realizar con equipos de lectura directa que proporcionan datos en el momento de la medida o bien con muestreadores que recogen las partículas y, posteriormente, se analizan. Los equipos de lectura directa se clasifican, en general, en dos grupos: uno, los equipos portátiles, fáciles de usar, de tamaño y peso reducido y de coste no muy elevado, como son los contadores de partículas por condensación (CPC), los clasificadores de partículas ópticos (OPS) o los cargadores por difusión (DC); y el otro, los equipos no portátiles, de mayor complejidad de uso, tamaño y peso y de coste más elevado que los equipos anteriores, como son el separador de barrido de las partículas por

Tabla 1 ■ Características de algunos equipos de lectura directa portátiles

Equipo	Rango de medida	Rango de concentración	Métrica
CPC 3007 	10 nm - 1 µm	0 - 1x10 ⁵ partículas/cm ³	Concentración total de partículas
OPS 3330 	0,3 µm - 10 µm	0 - 3000 partículas/cm ³	Distribución de tamaño de partículas. Concentración total de partículas
DiSCmini 	10 nm - 700 nm	5x10 ² - 5x10 ⁵ partículas/cm ³ (para 100 nm)	Concentración total de partículas. Área superficial de las partículas depositadas en la zona alveolar del pulmón. Diámetro de partícula medio

Tabla 2 ■ Algunos sistemas de captación de partículas para posterior análisis

Muestreador	Caudal (l/min)	Determinación
GK 2,69 	4,2	Masa de partículas
Cassette abierta de poliestireno 	2	Microscopía electrónica SEM
MPS 	0,5	Microscopía electrónica TEM

SEM: Scanning Electron Microscopy. MPS: Mini Particle Sampler. TEM: Transmission Electron Microscopy.

movilidad (SMPS) o el impactador eléctrico de baja presión (ELPI). En la Tabla 1 se observan las características más destacadas de algunos equipos portátiles. Con respecto a los dispositivos que recogen las partículas para su posterior análisis, se pueden utilizar muestreadores de la fracción respirable, como, por ejemplo, los ciclones, para la determinación de la masa de las partículas y cualquier tipo de sistema de captación de partículas que permita su posterior análisis mediante microscopía electrónica (véase la Tabla 2).

Las mediciones de nanomateriales que se realizan en los lugares de trabajo

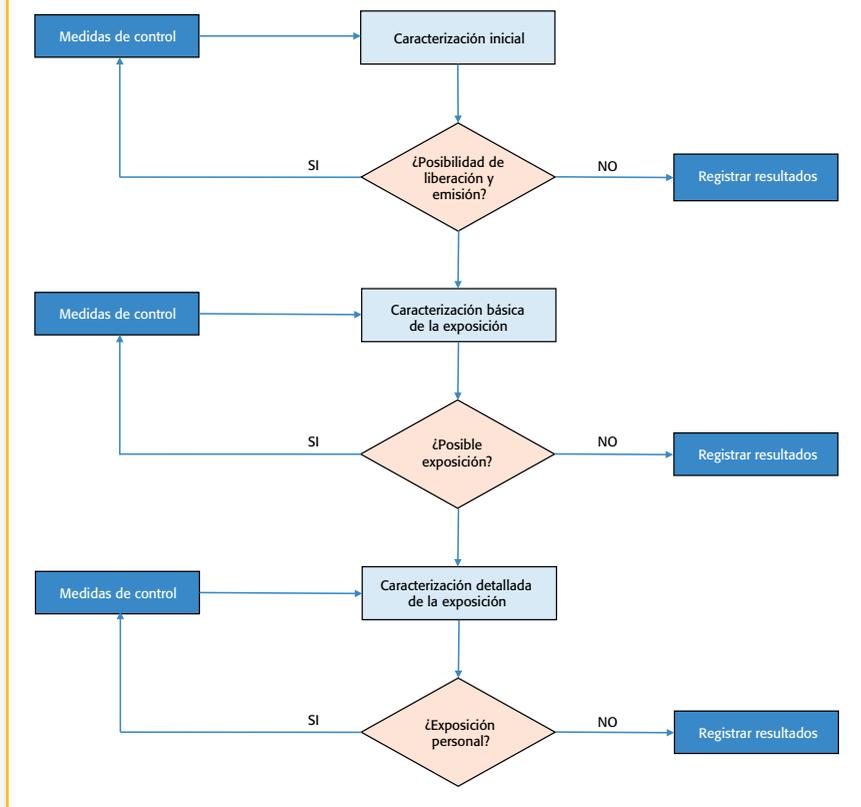
pueden tener diferentes objetivos, como pueden ser, entre otros, la identificación de fuentes de emisión de partículas nanométricas, la evaluación de la efectividad de las medidas de control implementadas, la determinación de la exposición o la verificación de la conformidad con los valores límite de exposición profesional. La estrategia de medición a seguir depende del objetivo para el que se realicen las mediciones. Así, por ejemplo, para evaluar la efectividad de las medidas de control adoptadas puede utilizarse el procedimiento para la caracterización de las emisiones potenciales de nanomateriales descrito en el documento ["Seguridad y](#)

[Salud en el trabajo con nanomateriales"](#) [3] y aplicado en los estudios de investigación realizados sobre la evaluación de la exposición a distintos nanomateriales, como dióxido de titanio, nanotubos de carbono y grafeno en diferentes actividades y cuyos resultados están pendientes de publicar. Por otra parte, si el objetivo de las mediciones fuese verificar la conformidad con los valores límite de exposición profesional, la estrategia a seguir es la recogida en la norma UNE-EN 689 [4], pero, actualmente, en España no se dispone de límites de exposición profesional aplicables a los nanomateriales.

CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A NANOMATERIALES

Ante la ausencia de valores límite ambientales de obligado cumplimiento específicos para los nanomateriales, una posible opción para caracterizar las exposiciones a los mismos es el uso del procedimiento (véase la Figura 1) basado en tres etapas: caracterización inicial, caracterización básica y caracterización detallada, descrito en la norma UNE-EN 17058 [2]. Las diferentes etapas del procedimiento pueden utilizarse de forma independiente o de forma conjunta, escalonadamente. A continuación, se describe cada una de las etapas.

Figura 1 ■ Esquema del procedimiento para la caracterización de la exposición laboral a nanomateriales



Caracterización inicial

El objetivo de esta etapa es determinar si puede haber una liberación y emisión de nanomateriales al aire en el lugar de trabajo como consecuencia del proceso y manipulación de los mismos. Para ello, en esta etapa es necesario realizar una recogida exhaustiva de la información que, como mínimo, debe considerar los siguientes aspectos:

1. Información relacionada con el lugar de trabajo.

Se recogen los datos sobre el tipo de trabajo realizado, la cantidad de nanomaterial producido o manipulado, el volumen de producción y las dimensiones del local. Asimismo, se considerará la información relevante a las determinaciones de la exposición a polvo que se hayan realizado

previamente, a la localización y tipo de medidas de control y a cualquier tipo de recomendación que la empresa haya implementado al respecto.

2. Información relacionada con las actividades de trabajo.

En este apartado se incluye información sobre la identificación de focos de emisión de nanomateriales y las actividades relacionadas con la manipulación de los mismos, como, por ejemplo, el tipo de actividad (ej. síntesis o producción) o los procesos y etapas de manipulación (ej. pesada, embalaje, vertido y mezcla de nanomateriales). También se considerará la identificación de la presencia de otros procesos en el lugar de trabajo que puedan influir en las mediciones, así como la presencia o ausencia de

ventilación, aire acondicionado o corrientes de aire.

3. Información relacionada con el nanomaterial.

Se recopilan los datos sobre el tipo de nanomaterial manipulado, por ejemplo, el estado en el que se encuentra, en forma de polvo, dispersión líquida o como componente de un producto intermedio. También interesa conocer la composición química, su morfología y cualquier peligro conocido o potencial que pudiera presentar, incluyendo los relacionados con la salud, incendio y explosión.

La recogida y documentación de la información debe realizarse de forma exhaustiva y uniforme, por lo que se recomienda el uso de cuestionarios o plantillas que permitan recoger dicha información de una forma estructurada. Una herramienta que puede resultar de ayuda en esta etapa es el documento interactivo "[Nanomateriales en los lugares de trabajo. Recogida de información y medición de la exposición](#)" [5], que permite guardar toda la información contextual relacionada con la situación de trabajo además de los datos relativos a las mediciones.

Asimismo, en esta primera etapa es conveniente incluir una visita al lugar de trabajo para conocer las operaciones que se realizan con los nanomateriales. También se pueden tener en cuenta los resultados de mediciones anteriores, ya que podrían ayudar a identificar las posibles fuentes de emisión que hubiera en el lugar de trabajo.

El análisis de toda la información recopilada determina el potencial de liberación y emisión de nanomateriales en la situación de trabajo estudiada, dando lugar a tres posibles situaciones:



- El potencial de liberación y emisión de nanomateriales en el lugar de trabajo es elevado, por lo que habrá que revisar las medidas de control implementadas y, si fuera necesario, proponer medidas adicionales.
- No hay indicios de una posible liberación y emisión de nanomateriales, por lo que se puede dejar la situación como está pero registrando los resultados.
- Si no se puede descartar la liberación y emisión de nanomateriales, es necesario continuar con la siguiente etapa del procedimiento: la caracterización básica.

Caracterización básica

El propósito de esta etapa es determinar si hay una posible exposición a los nano-

materiales en el lugar de trabajo. Para ello, además de la información recogida en la caracterización inicial, se realizan mediciones con equipos portátiles de fácil manejo (véase la Tabla 1) de la concentración, en número y/o en área superficial, y se toman muestras personales de la fracción respirable para la determinación de la concentración en masa mediante análisis químico (véase la Tabla 2). En algunos casos, puede ser necesario complementar este análisis con muestras para microscopía electrónica: cuando hay dudas de presencia del nanomaterial en la masa analizada mediante análisis químico, para confirmar la ausencia de exposición a nanomateriales o cuando el método químico no es suficientemente sensible para cuantificar la concentración en masa de la sustancia investigada.

La estrategia de medición a seguir comienza con el análisis de las tareas

en las que puede haber una liberación de nanomateriales, ya que van a condicionar la duración y frecuencia de las mediciones. Asimismo, se deben tener en cuenta las condiciones ambientales del lugar de trabajo, como, por ejemplo, la posible presencia de corrientes de aire. Preferentemente, se toman muestras personales, es decir, el muestreador va fijado a la persona, pero, en el caso de que no sea posible, se sustituyen por muestras ambientales en las que el muestreador no está fijado a la persona, sino que está situado en una ubicación concreta. En algunas situaciones, puede optarse por conectar el equipo de medida a un tubo de conexión cuya entrada de aire se sitúe en la zona de respiración de la persona.

Además de las mediciones que se realizan para determinar la exposición a los nanomateriales durante la actividad con los mismos, es necesario realizar mediciones del denominado nivel de fondo (*background*) para conocer la concentración de partículas en el lugar de trabajo en los periodos en los que no hay actividad con el nanomaterial. Las determinaciones del nivel de fondo se pueden realizar, bien de forma simultánea, utilizando dos equipos iguales y situando uno en la zona donde se encuentra la persona y el otro en una zona que no se vea afectada por la actividad con los nanomateriales; bien de forma secuencial, utilizando un único equipo que registre los datos durante los periodos anteriores y posteriores a la actividad.

La duración de las mediciones de las concentraciones en número de partículas o en cualquier otra métrica, realizadas con los equipos para determinar la exposición y los niveles de fondo, debe ser de al menos 15 minutos, siendo recomendable que se prolonguen mientras dure la actividad. No obstante, cuan-

do el tiempo de la posible emisión sea inferior a 15 minutos, las mediciones se realizarán durante dicho periodo.

Los dispositivos a utilizar para tomar muestras personales incluyen el uso de muestreadores de la fracción respirable, que permiten determinar la concentración en masa mediante análisis químico y sistemas de captación de partículas (muestreador, MPS, etc.), que recogen muestra para su posterior identificación mediante microscopía electrónica. La duración del muestreo va a depender de los requisitos del posterior análisis y de la duración e intensidad de la actividad con los nanomateriales.



En esta etapa de mediciones, además de toda la información contextual relacionada con la actividad, es importante reco-

ger los datos relativos a los equipos utilizados en las mediciones (identificación, ubicación, tiempo de muestreo, caudal, etc.) y constatar la posible presencia de fuentes secundarias de partículas nanométricas en el lugar de trabajo. Como se ha mencionado en el apartado anterior, el documento [“Nanomateriales en los lugares de trabajo. Recogida de información y medición de la exposición”](#) puede facilitar la recopilación de toda esta información.

La evaluación de los resultados obtenidos en la caracterización básica se basa en el análisis conjunto de los datos proporcionados por los equipos de lectura directa, los resultados de las muestras personales que se han tomado y la información contextual referente a la actividad con los nanomateriales.

Con respecto a los datos obtenidos con los equipos, hay que analizar si en la serie de datos hay algún valor anómalo y si se corresponde con alguna incidencia registrada durante el periodo de medida. Además, se debe analizar la estabilidad de las series de datos y ver si hay cualquier fluctuación en ellas. A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra los datos de las mediciones realizadas durante una actividad con nanomateriales en las que se utilizaron de forma simultánea los equipos CPC 3007 y OPS 3330, que se situaron en la proximidad del foco de

emisión y en una zona que no estaba afectada por la actividad para determinar el nivel de fondo. Como mínimo, se calcula el valor medio y la desviación estándar tanto de la serie de datos correspondiente a la actividad como de la del nivel de fondo. En general, la desviación estándar de la serie de datos del nivel de fondo suele ser del mismo orden de magnitud o inferior a la desviación estándar de los valores que corresponden a la actividad, por lo que, en estos casos, el valor medio del nivel de fondo se puede restar del valor medio obtenido durante la actividad.

Una vez calculados los valores medios y las desviaciones estándar de las series de datos de la actividad y del nivel de fondo, la interpretación de los resultados obtenidos con los equipos de lectura directa se puede realizar utilizando un método estadístico o el método de regla de decisión que se describe a continuación. En este método para determinar si la exposición a los nanomateriales es significativa se aplica la siguiente ecuación:

$$M_{act} > M_{bgr} + 3 \times SD_{bgr} \quad (1)$$

donde:

M_{act} es la concentración media de partículas en suspensión en el aire durante la actividad, en número y/o área superficial;

Figura 2 Resultados de las mediciones realizadas durante una actividad con nanomateriales

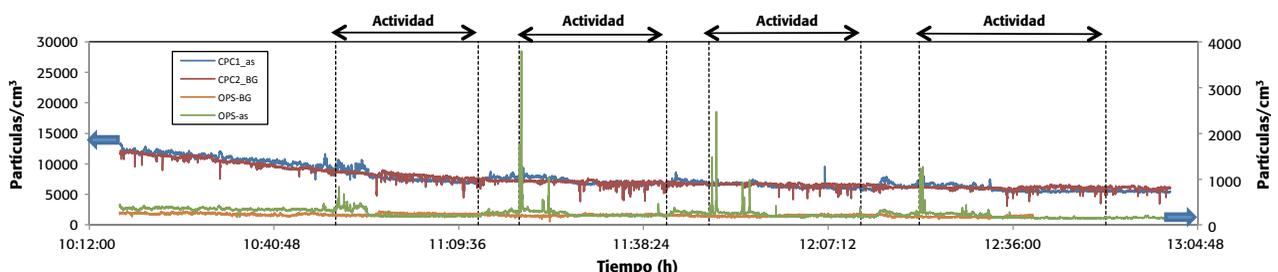


Tabla 3 Posibles conclusiones sobre la probabilidad de exposición causada por la actividad con el nanomaterial

Resultados de las muestras personales (Presencia de partículas respirables en suspensión en el aire en la zona respiratoria que tienen una composición química idéntica al nanomaterial investigado)	Resultados de los equipos de lectura directa (Significación del efecto de la actividad ¹)	Conclusión (Probabilidad de exposición causada por la actividad con el nanomaterial)
+	significativo	probable ²
+	no significativo	posible/no se puede descartar
-	significativo ³	posible/no se puede descartar
-	no significativo	improbable

1. El nivel de exposición se considera significativo cuando el nivel del efecto de la actividad (la diferencia entre los valores medios en concentración de partículas entre el nivel de fondo y la zona respiratoria durante la actividad) es significativo al aplicar la ecuación (1).
2. La probabilidad puede pasar a posible/no se puede descartar cuando se observan fuentes secundarias.
3. Indica la presencia de nanopartículas generadas en el proceso. Estas partículas no han sido investigadas en las muestras personales.

M_{bgr} es la concentración media de partículas en suspensión en el aire del nivel de fondo, en número y/o área superficial;

SD_{bgr} es la desviación estándar de la concentración de partículas en suspensión en el aire del nivel de fondo, en número y/o área superficial.

La exposición a los nanomateriales se considera significativa cuando la concentración media de partículas en suspensión en el aire durante la actividad es superior a la suma de la concentración media de partículas en suspensión en el aire del nivel de fondo y el valor de tres veces la desviación estándar de la concentración de partículas del nivel de fondo (véase la ecuación 1).

En esta etapa, los resultados de las muestras personales recogidas tanto para análisis químico como para microscopía electrónica se consideran desde un punto de vista cualitativo, es decir, para determinar la presencia del nanomaterial en las muestras. Esta información puede complementarse con los datos cuantitativos.

Por otro lado, la información contextual puede recoger la presencia de fuentes secundarias de partículas nanométricas durante la actividad que pueden interferir en los resultados y que se debe tener en cuenta a la hora de interpretar los datos obtenidos con los equipos de lectura directa y los resultados de las muestras personales.

Considerando los resultados de las mediciones realizadas con los equipos de lectura directa junto con los de las muestras personales, se llega a diferentes conclusiones sobre la probabilidad de exposición causada por la actividad con el nanomaterial, tal como se recoge en la Tabla 3.

En los casos en los que la exposición sea probable, habrá que implementar medidas de control, mientras que cuando sea improbable será suficiente con registrar los resultados. Cuando la probabilidad de exposición causada por la actividad con el nanomaterial sea posible o no se pueda descartar, se pueden implementar medidas de control o se puede continuar con la siguiente etapa

del procedimiento: la caracterización detallada.

Asimismo, y con carácter complementario a las conclusiones descritas en la Tabla 3, los valores de referencia recomendados [3] para los nanomateriales por organizaciones de reconocido prestigio, pueden resultar de ayuda en la toma de decisión sobre la necesidad de reducir el riesgo de exposición al nanomaterial en una determinada situación de trabajo [2].

Caracterización detallada

El objetivo de la caracterización detallada es determinar de forma exhaustiva las partículas presentes en la zona respiratoria, permitiendo, por ejemplo, cuantificar la exposición personal. Para ello, siempre que sea posible, se utilizarán equipos que permitan el muestreo personal y, en caso de no ser posible, la entrada del aire en el equipo o en el muestreador estará lo más cerca posible de la zona respiratoria de la persona, por lo que se pueden utilizar tubos de conexión tal y como se ha descrito en el punto anterior.

En esta etapa, además de los equipos portátiles usados en la caracterización básica, se utilizan los siguientes equipos: i) analizadores de movilidad eléctrica para determinar la distribución del tamaño en número de partículas submicrométricas; ii) analizadores ópticos o aerodinámicos así como el ELPI para conocer la distribución del tamaño en número de partículas superiores a 500 nm; iii) contadores de partículas por condensación o cargadores de difusión para determinar la concentración del número total de partículas; y iv) equipos de medición del área superficial de las nanopartículas para obtener la concentración del área superficial de las partículas depositadas en el pulmón, generalmente en la zona alveolar. Cabe señalar que estos equipos son más so-

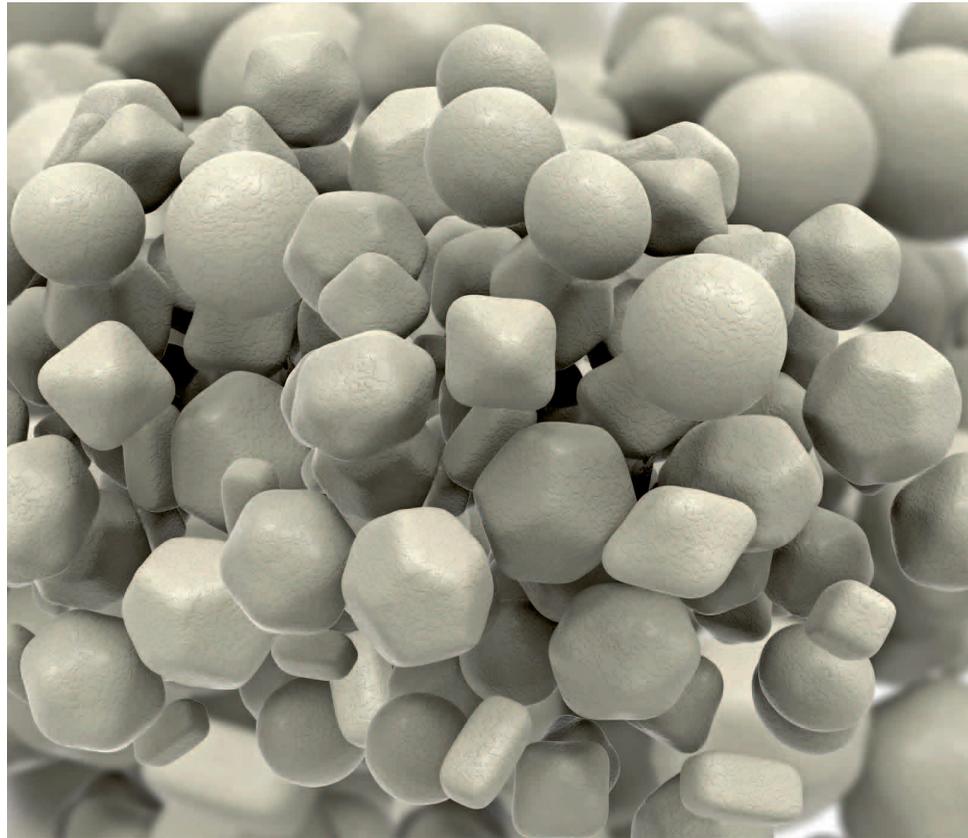
fisticados que los descritos en la etapa anterior y, para su uso, se requiere mayor conocimiento y experiencia.

Además de los equipos de lectura directa, se emplean muestreadores personales para recoger las fracciones relacionadas con la salud, principalmente la fracción respirable, para posterior análisis químico. También se utilizan dispositivos que permiten muestrear las partículas para análisis por microscopía electrónica, así como otros muestreadores ambientales y personales, que permiten recoger las partículas en función del tamaño o los que imitan la sedimentación de las partículas en el pulmón.

La estrategia de medición a seguir será similar a la indicada en la caracterización básica y la información relacionada con la medición puede recogerse según se indica en el documento "[Nanomateriales en los lugares de trabajo. Recogida de información y medición de la exposición](#)".

Con respecto a los datos proporcionados por los equipos, se debe indicar el diámetro equivalente utilizado y calcular el valor medio y las lecturas máxima y mínima para todo el periodo de actividad y también para el nivel de fondo. Asimismo, estos tres valores se deben obtener para diferentes intervalos de tamaño de partículas: desde el valor inferior que se puede determinar hasta 100 nm; de 100 nm a 400 nm; de 400 nm a 1 μm ; y de 1 μm a 10 μm . Al igual que en la etapa anterior, se calcula la relación de concentración durante la actividad con respecto al nivel de fondo, no solamente para todo el rango de tamaño, sino también para los intervalos indicados anteriormente.

En esta etapa, la identificación de las partículas mediante análisis químico o microscopía electrónica es la clave para interpretar la exposición a los nanomate-



riales. Además de la información cualitativa, el análisis también permite conocer la cuantitativa.

Finalmente, y tras el análisis de los datos y de la información contextual de la actividad con el nanomaterial, se pueden dar dos situaciones: una, en la que claramente hay un aumento de la exposición personal y, en consecuencia, se deben adoptar medidas de control que reduzcan o eliminen la emisión; y otra, en la que parece que no hay un aumento de la exposición personal al nanomaterial, por lo que en este caso sería suficiente con registrar los resultados.

CONSIDERACIONES FINALES

Los nanomateriales son agentes químicos, por lo que les es de aplicación el

Real Decreto 374/2001 y, por tanto, la evaluación de los riesgos derivados de la exposición por inhalación a los mismos deberá incluir la medición de las concentraciones en el aire, en la zona de respiración del trabajador, y su posterior comparación con el valor límite ambiental que corresponda. En relación con las mediciones a realizar, merecen ser destacados los siguientes aspectos:

- Los efectos toxicológicos de los nanomateriales parecen guardar más relación con el número o el área superficial de las partículas que con su masa, por lo que se recomienda que las mediciones de las exposiciones a nanomateriales se realicen en diferentes métricas (número, área superficial, masa, etc.).

- Una característica a considerar es que las partículas nanométricas tienden a unirse unas con otras dando lugar a aglomerados y agregados de tamaño superior a 100 nm, por lo que se recomienda que en las mediciones se consideren las partículas de hasta 10 µm.
- Algunos de los equipos de medición de nanopartículas son portátiles, de fácil uso y de coste no muy elevado, por lo que resultan prácticos en las mediciones de rutina. Sin embargo, los equipos más complejos, orientados a la investigación, proporcionan información más detallada de las características de los nanomateriales y se requiere la intervención de personal técnico especializado para su manejo.
- Los equipos de lectura directa utilizados en las mediciones de exposiciones a nanomateriales se pueden complementar con muestras de la fracción respirable en las que se determina el nanomaterial por análisis químico, así como muestras específicas que permiten identificarlos mediante microscopía electrónica.

El riesgo de exposición por inhalación a los nanomateriales no se puede evaluar de la misma manera que cualquier otro agente químico que se presente en forma de materia particulada, es decir, verificando la conformidad con los valores límite ambientales, ya que en España no se dispone de límites de exposición profesional aplicables a los nanomateriales. No obstante, las mediciones que caracterizan la exposición a los mismos, que se pueden realizar con los equipos disponibles en el mercado, pueden permitir evaluar la efectividad de las medidas de control y, en consecuencia, eliminar o reducir el riesgo de exposición a los mismos.

Actualmente, una alternativa consensuada a nivel europeo para caracterizar dichas exposiciones es la metodología descrita en la norma UNE-EN 17058, cuyos aspectos más relevantes se recogen en este artículo y se resumen así:

- El procedimiento está basado en tres etapas, con objetivos diferentes (posibilidad de liberación y emisión, posible exposición y exposición personal), que se pueden utilizar de forma individual o conjunta.

- La evaluación de los resultados obtenidos se basa en el análisis conjunto de los datos proporcionados por los equipos de lectura directa, los resultados de las muestras personales y la información contextual referente a la actividad con los nanomateriales.

- Las medidas de control para eliminar o reducir el riesgo de exposición pueden adoptarse en cada etapa del procedimiento.

Finalmente, y desde un punto de vista práctico, el uso de equipos de lectura directa portátiles junto con la toma de muestras para análisis químico y microscopía electrónica se presentan como una buena opción a utilizar en las mediciones de rutina. Así, los datos de estas mediciones junto con la información contextual relacionada con la actividad permiten determinar si existe una posible exposición a nanomateriales en el lugar de trabajo y, por lo tanto, tomar la decisión de si deben implementarse medidas de control para eliminar o reducir el riesgo de exposición. ●

■ Bibliografía ■

[1] INSST, 2019. *Potencial exposición a nanomateriales en entidades de I+D+i*. Documento Divulgativo. DD.105.1.19. Madrid. NIPO (en línea): 871-19-090-1.

Disponible en: <https://www.insst.es/-/potencial-exposicion-a-nanomateriales-en-entidades-de-i-d-i->

[2] Norma UNE-EN 17058:2018 (Ratificada). *Exposición en el lugar de trabajo. Evaluación de la exposición por inhalación de nanobjetos y sus aglomerados y agregados*.

[3] INSHT, 2015. *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales*. Estudio Técnico. ET.136.1.15. Madrid. NIPO (en línea): 272-15-054-5.

Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/96076/sst+nanomateriales/bd21b71fd5ec-4ee8-8129-a4fa58480968>

[4] Norma UNE-EN 689:2019. *Exposición en el lugar de trabajo. Medición de la exposición por inhalación de agentes químicos. Estrategia para verificar la conformidad con los valores límite de exposición profesional*.

[5] INSST, 2018. *Nanomateriales en los lugares de trabajo. Recogida de información y medición de la exposición*. Documento Divulgativo. DD.100.1.18. Madrid. NIPO (en línea): 276-18-089-0.

Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/538970/Nanomateriales+en+los+lugares+de+trabajo.pdf/07b9cc40-fac7-46a2-b122-cd99e5937555>