



Nanomateriales: Medidas preventivas en laboratorios de investigación

Nanomaterials: Preventive measures in R & D laboratories
Nanomateriaux: Mesures préventives dans les laboratoires de recherche

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), O.A., M.P.

Esta NTP proporciona información y recomendaciones sobre medidas preventivas que pueden adoptarse en el trabajo con nanomateriales en laboratorios de investigación

Elaborado por:

Araceli Sánchez Jiménez

Agurtzane Zugasti Macazaga

CENTRO NACIONAL DE VERIFICACIÓN DE MAQUINARIA. INSST

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales (NMs) tal y como los define la Comisión Europea, son materiales de origen natural, accidental o fabricados que contienen partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado, y en los que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presenta una o más de las dimensiones externas en el intervalo de tamaño comprendido entre uno y cien nanómetros, incluidos los fullerenos, los copos de grafeno y los nanotubos de carbono de pared simple con una o más dimensiones exteriores inferiores a 1 nm (Recomendación 2011/696/EU). Esta definición está siendo actualmente revisada como parte de la Estrategia de Sustancias Químicas de la Unión Europea (Review of the Recommendation 2011/696/EU).

Los NMs manufacturados hacen referencia a aquellos producidos intencionadamente con unas propiedades específicas. Su uso se ha extendido a un gran abanico de sectores (construcción, medicina, agricultura, etc.). Por ejemplo, el TiO_2 nanométrico tiene una gran aplicación en recubrimientos, otorgándoles propiedades innovadoras: dispersa la luz de forma muy efectiva y en su tamaño nano no blanquea, por lo que se usa ampliamente como pigmento en pinturas; por sus propiedades fotocatalíticas, se usa como descontaminante atmosférico (NO_x , VOCs) añadido al as-

falto y en fachadas, o como autolimpiador al ser capaz de descomponer la materia orgánica; también puede absorber la radiación UV, usándose en cremas de protección solar.

Al disminuir el tamaño de un material a la escala nano sus propiedades cambian y no se comporta ni como el mismo material en tamaño micro ni como átomos. Dependiendo de su composición y estructura, estos materiales pueden tener superficies muy reactivas, pudiendo ocasionar efectos adversos sobre la salud e incluso, dar lugar a reacciones catalíticas y explosiones. Por ello, desde un punto de vista preventivo, no debe asumirse que los NMs presentan idénticos peligros que los mismos materiales en tamaño micro.

Los NMs pueden penetrar en el organismo a través de diferentes vías de entrada como la inhalatoria, dérmica, oral o en el caso de aplicaciones médicas, parenteral, siendo la inhalatoria, la principal de ellas. Dependiendo de su tamaño, las partículas nanométricas se depositan en las distintas zonas del tracto respiratorio. Así, las de diámetros superiores a 7 nm se encuentran en mayor proporción en la región alveolar, mientras que las de diámetros inferiores se depositan principalmente en la región nasofaríngea. En la figura 1 se muestra la deposición prevista de las partículas, total y por regiones, relacionada con el tamaño de la partícula, de acuerdo al modelo ICRP (ICRP, 1994).

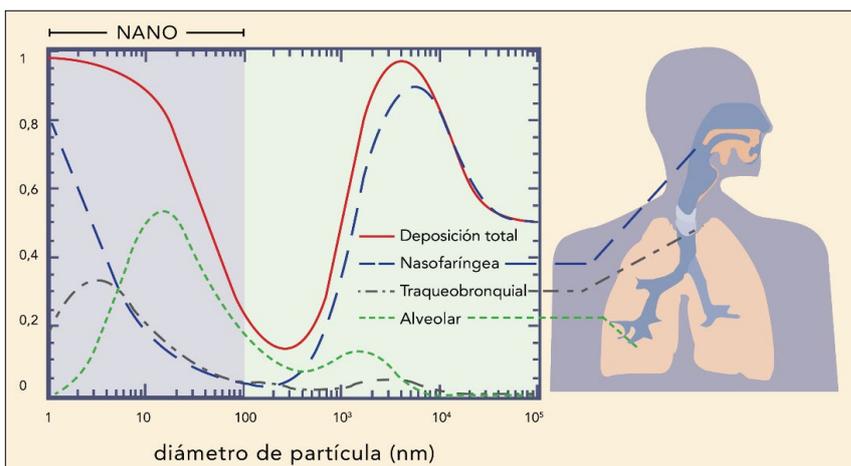


Figura 1. Probabilidad de deposición de partículas en el tracto respiratorio según su tamaño (adaptado de la figura de la página 29 del informe técnico UNE-ISO/TR 12885:2010 IN "Nanotecnologías. Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías").

En cuanto a la exposición dérmica, las partículas con un tamaño inferior a 4 nm pueden penetrar la piel sana (Larese Filon *et al.*, 2018). La ingestión de NMs puede ocurrir de forma accidental por contacto de las manos u objetos contaminados con la boca.

Los principales factores que influyen en la toxicidad intrínseca de los NMs son aquellos que hacen referencia a sus características fisicoquímicas (tamaño, forma, área superficial, composición, impurezas y tratamiento y funcionalización de la superficie), su comportamiento una vez que son absorbidos por el organismo (solubilidad, hidrofobicidad, potencial zeta) y los efectos que tienen (reactividad biológica, potencial redox, capacidad para formar radicales libres y fotoreactividad) (ECHA, 2019).

Los efectos adversos para la salud derivados de la exposición a NMs no son concluyentes y tampoco se pueden generalizar para todos los NMs. La mayoría de los estudios que indican efectos adversos se han realizado en tejidos celulares y en animales. Estudios en ratones y ratas muestran que algunos nanotubos y nanofibras debido a su naturaleza fibrosa causan inflamación pulmonar y fibrosis (Poland *et al.*, 2008; Donaldson *et al.*, 2013). En cuanto a los efectos observados en personas, una revisión bibliográfica de 27 estudios epidemiológicos de trabajadores expuestos a NMs concluye que, aunque se observan cambios en biomarcadores de estrés oxidativo, cardiovasculares y epigenéticos e inflamación pulmonar, no se detectan efectos adversos en la salud. No obstante, los autores advierten que dichos resultados negativos podrían deberse al corto periodo de exposición (Schulte *et al.*, 2019). Sin embargo, desde hace tiempo se conoce que las partículas ultrafinas (partículas < 100 nm, no intencionadamente manufacturadas) afectan al aparato respiratorio y cardiovascular (Donaldson *et al.*, 2003).

Por otro lado, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) clasifica como posibles cancerígenos en humanos los nanotubos de carbono de pared múltiple del tipo MWCNT-7 (IARC, 2017) y las partículas finas y ultrafinas del dióxido de titanio (IARC, 2010). Asimismo, el Reglamento UE 2020/217 clasifica, a partir del 1 de octubre de 2021, el dióxido de titanio en forma de polvo que contenga el 1 % o más de partículas con un diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu\text{m}$ como carcinógeno de categoría 2 por inhalación.

Los NMs también presentan riesgos para la seguridad. A medida que disminuye el tamaño de partícula, aumenta el área superficial y la facilidad de ignición, resultando estos materiales más explosivos e inflamables que los de mayor tamaño. En aquellos escenarios donde haya riesgo de formación de atmósferas explosivas se deberá aplicar el Real Decreto 681/2003 sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

En general, los laboratorios de investigación se caracterizan por utilizar una gran variedad de NMs en pequeñas cantidades (menos de 1 kg al mes), siendo los más empleados: SiO_2 , TiO_2 , grafeno, Ag, Au, nanotubos de carbono, ZnO, óxidos de hierro, nanoarcillas, Al_2O_3 y nanocelulosa (INSST, 2019). En cuanto a las actividades, las más comunes en los laboratorios de investigación son la creación de mezclas para la formulación y el análisis de las propiedades de los NMs sintetizados o de los productos que los contienen, si bien también se realizan otras actividades dependiendo de cada centro como por ejemplo, extrusión, deposición en capa fina o pulverización.

2. MEDIDAS PREVENTIVAS GENERALES

Las medidas preventivas para eliminar y reducir los riesgos de los NMs incluirán como en el caso de cualquier otro agente químico, medidas de seguridad en el diseño y en caso de que no se pueda eliminar, se adoptarán:

- 1) medidas técnicas para evitar la liberación de los NMs (aerosolización) al ambiente y dispersión de los mismos,
- 2) medidas organizativas para minimizar la exposición de los trabajadores, y
- 3) uso de equipos de protección individual cuando las medidas anteriores no sean suficientes para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores.

Los NMs se caracterizan por una gran capacidad de difusión y persistencia en el ambiente, mostrando un comportamiento similar a los gases y vapores. Debido a su pequeño tamaño, pueden permanecer en suspensión en el aire durante semanas, y por tanto, ser inhalados. Por ejemplo, una partícula esférica de 100 nm de diámetro y 1 g/cm³ de densidad permanece en el aire 304 horas antes de que se deposite por acción de la gravedad desde un metro de altura (GAef, 2020). Sin embargo, si el tamaño es de 1 μm se depositará en 7,5 horas, y si fuese de 10 μm , lo haría en 6,1 minutos. Por tanto, es de especial importancia planificar bien el trabajo para evitar la aerosolización y dispersión de los NMs. Asimismo, se aplicará el principio de precaución y la exposición se reducirá a niveles tan bajos como sea posible.

Planificar el trabajo

A continuación, se indican algunas medidas que pueden ser de ayuda en la planificación del trabajo con NMs en los laboratorios de investigación.

- Consultar la ficha de datos de seguridad (FDS) y seguir las instrucciones de manipulación. En caso de no disponer de FDS, consultar la bibliografía y aplicar el principio de precaución.
- Elaborar un procedimiento de trabajo específico para las tareas que impliquen el uso de NMs, donde se recoja, además del propio procedimiento, los riesgos y las medidas preventivas para los trabajadores
- Asignar una sala o zona específica en el laboratorio, a ser posible con presión negativa, señalizar y limitar el acceso a la misma.
- Optimizar los espacios y el equipamiento para poder hacer todas las operaciones sin tener que trasladarse de una sala a otra. La seguridad más efectiva es la que se consigue en la fase de diseño.
- No manipular NMs en zonas abiertas. Siempre que sea posible, utilizar un sistema cerrado como por ejemplo, cabinas de extracción.
- Optimizar el procedimiento para reducir el número y la duración de los pasos a efectuar y así con ello, el tiempo de exposición.
- Minimizar el número de personas en las áreas de manipulación. Es aconsejable llevar un registro donde se incluya el tipo de NM, cantidades utilizadas, duración y frecuencia de la tarea y trabajadores expuestos.
- En la medida de lo posible, adquirir los NMs en envases de tamaño acorde a las cantidades que se vayan a necesitar.
- Almacenar los NMs en recipientes rígidos, herméticos, cerrados, y debidamente etiquetados, en lugares bien ventilados y sin fuentes de ignición.
- En el laboratorio, disponer solamente de la cantidad

de NM que se vaya a utilizar y mantener el recipiente cerrado siempre que no se utilice.

- En caso de NMs potencialmente explosivos, aplicar medidas adecuadas para su uso y almacenamiento con el fin de evitar el riesgo de incendio y explosión.
- Se recomienda disponer de máscara completa P3 para que en caso de accidente los operarios se puedan proteger con rapidez. La localización de este equipo debe estar señalizada.

Evitar la aerosolización y dispersión del material

La exposición a los NMs por inhalación puede reducirse o incluso eliminarse adoptando medidas que eviten la aerosolización y dispersión del material, como, por ejemplo:

- Priorizar la utilización de NMs en forma de suspensión líquida, de gel, en estado agregado o aglomerado, en pastillas o incorporados a una matriz.
- Evitar la manipulación en forma de polvo.
- Eliminar o limitar ciertas operaciones que pueden favorecer la aerosolización y dispersión del material (p. ej. trasvase abierto, pulverización).
- Usar la mínima cantidad necesaria para la actividad y guardarlos inmediatamente después de su uso.
- Evitar adquirir o almacenar NMs en forma de polvo en bolsas ya que al abrirlas se pueden liberar partículas del NM al ambiente. Es preferible el uso de recipientes rígidos con tapón roscado para evitar la liberación del material al abrir el envase debido a diferencias de presión.
- En caso de posible aerosolización del material, se deben emplear medidas técnicas para evitar su dispersión como son las cabinas de extracción. Si la operación no se puede realizar dentro de una cabina, utilizar campanas de extracción. Otras medidas adicionales pueden ser, por ejemplo, el uso de una alfombrilla conductiva en la superficie de manipulación que se pueda limpiar al terminar o colocar un papel húmedo que se desechará como residuo peligroso cuando se finalice la actividad.

3. MEDIDAS PREVENTIVAS ESPECÍFICAS

A continuación, se indican medidas preventivas específicas para las actividades más comunes en laboratorios de I+D+i.

Operaciones de trasvase de polvo

- Para transferir pequeñas cantidades (< 10 g), utilizar cabinas de extracción (véase apartado 4).
- Para cantidades mayores o para trasvases frecuentes es conveniente implementar un sistema cerrado.
- Reducir la distancia del trasvase.

Operaciones con suspensiones líquidas

La agitación vigorosa de suspensiones líquidas (p. ej. sonicación) puede dar lugar a la aerosolización del material, por lo que estas operaciones deben realizarse dentro de una cabina de extracción (véase apartado 4). Por otro lado, se recomienda realizar las operaciones de trasvase a la menor distancia posible.

Operaciones de mecanizado

Durante las operaciones de mecanizado (p. ej. lijado, corte, taladrado, serrado, etc.) de nanocompuestos (combinación de un material de dimensiones nanométricas en una matriz normalmente polimérica), así como en operaciones

de triturado o molienda, se liberan una gran cantidad de partículas pequeñas con y sin el NM incorporado. El calor producido también puede degradar la matriz liberando el NM. Por tanto, para reducir la exposición en este tipo de operaciones es necesario adoptar medidas preventivas, tales como:

- Usar la menor energía posible.
- Utilizar un sistema de pulverización de agua para evitar la dispersión del polvo. La nube de agua tiene que ser evacuada a través de un sistema de extracción localizada.
- Usar las campanas de extracción lo más cerca posible del punto de emisión ya que la eficacia de aspiración disminuye rápidamente con la distancia (véase apartado 4.2).
- Emplear herramientas con extracción localizada y aporte de agua incorporado por ser muy eficaces debido a la elevada velocidad de aspiración y al pequeño volumen de aire requerido.

Operaciones de aplicación con pistola

Durante las operaciones de aplicación con pistola se produce una gran cantidad de partículas debido a la presión a la que sale la suspensión empleada y al rebote del chorro en la superficie a cubrir. Además de las partículas, también puede haber exposición a compuestos orgánicos volátiles procedentes del disolvente utilizado. Por ello, siempre que sea posible, se debe emplear brocha, rodillo o procesos de inmersión.

Las pistolas que utilizan un sistema de proyección de aire a presión dan lugar a una mayor exposición. Por tanto, es preferible usar pistolas donde la disolución a utilizar llega presurizada y no es necesario usar aire para la pulverización (*airless*) o pistolas de pulverización HVLP (*High Volume Low Pressure*) que generan menos neblina. Estas últimas además ofrecen una tasa de transferencia mayor (hasta un 75 %) a una presión de trabajo de 1,5-2 bares en la entrada de la pistola. Su principal inconveniente es que la velocidad de aplicación es inferior y es necesario acercarse más a la pieza.

Cuando se traten piezas pequeñas, se recomienda trabajar en una cabina de extracción con ventilación descendente y, preferentemente, con cortina de agua. Para piezas grandes u operaciones de recubrimiento por pulverización a alta temperatura y velocidad, se debe utilizar una cabina de pintura cerrada con sistema de ventilación. Al terminar la operación, para evitar contaminar zonas próximas, no debe abrirse la puerta de la cabina hasta que la concentración de partículas haya alcanzado los niveles de fondo, es decir, los niveles previos al inicio de la operación.

Operaciones de síntesis y recogida de material del reactor

La recogida de material del reactor, las operaciones de limpieza de reactores y equipos y el mantenimiento de los mismos pueden dar lugar a la liberación de NMs que pueden permanecer en suspensión en el aire durante semanas. En este tipo de operaciones, la mejor opción es la seguridad en el diseño y, por tanto, un sistema de recogida de material, cerrado y automático, ofrecería las mejores garantías para prevenir la exposición. En caso de que dicho diseño no sea posible, se recomienda el uso de sistemas de extracción localizada durante la recogida (véase apartado 4) y la limpieza en húmedo, siempre que sea posible.

4. SISTEMAS DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA

Los sistemas de extracción localizada son la medida de control que se implementa habitualmente en los laboratorios de investigación (INSST, 2019). En el mercado existen distintos tipos y en esta NTP, se han clasificado en dos grupos, por un lado, las cabinas de extracción y por otro, las campanas de extracción. En las primeras, el sistema de extracción encierra el foco de emisión del contaminante, mientras que en las campanas de extracción, el grado de encerramiento es menor. A continuación, se indican las características técnicas más relevantes de cada uno de ellos que pueden afectar a la manipulación segura de los NMs.

En todo caso, es imprescindible realizar un mantenimiento adecuado del sistema de extracción y asegurarse, cada vez que se utiliza, que funciona correctamente.

Cabinas de extracción

En este grupo se incluyen las vitrinas de gases y las cabinas de seguridad biológica (CSB). En las imágenes que se adjuntan (figuras 2 a 5), se indica la dirección de entrada y salida del flujo del aire en la zona de trabajo así como la velocidad del aire para los distintos tipos de cabinas, de acuerdo con la información facilitada por diferentes fabricantes.

En las vitrinas de gases (figura 2) el aire entra por el frontal de la cabina, generalmente, a una velocidad entre 0,4 y 0,6 m/s, proporcionando, en principio, protección al usuario y no al producto. No obstante, debido al alto flujo pueden generarse turbulencias que hacen que se pueda liberar material al exterior donde se encuentra el usuario.

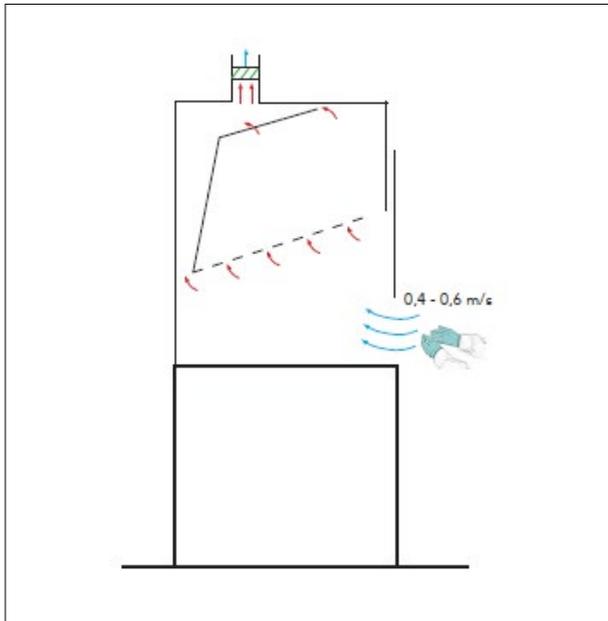


Figura 2. Esquema de funcionamiento de una vitrina de gases.

Dentro de este grupo, se incluyen también las vitrinas de gases de pesada (figura 3) que tienen en general, un fundamento similar al de las vitrinas de gases, siendo la velocidad del aire en la parte frontal alrededor de 0,4 m/s. Protegen solamente al usuario, pero disponen de flujo laminar horizontal que evita la formación de turbulencias.

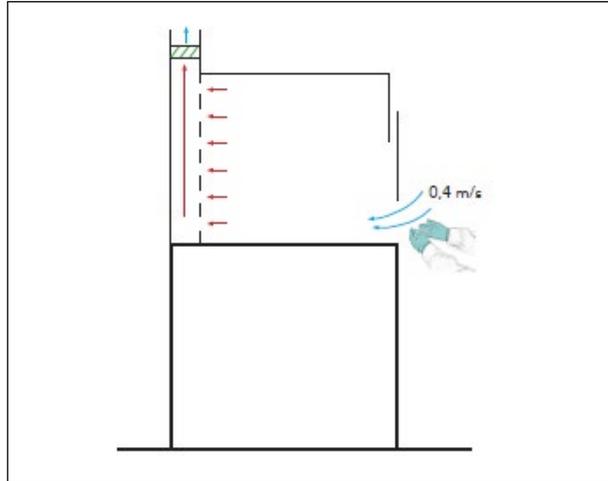


Figura 3. Esquema de funcionamiento de una vitrina de gases de pesada.

Las cabinas de seguridad biológica están diseñadas, en principio, para ofrecer protección al usuario y al ambiente de los riesgos asociados a la manipulación de material infeccioso y otros materiales biológicos peligrosos. No obstante, dependiendo de sus características, pueden utilizarse en otro tipo de actividades. De acuerdo con la norma UNE-EN 12469, las cabinas de seguridad biológica se clasifican en tres tipos: CSB clase I, CSB clase II y CSB clase III, siendo las de clase II las más utilizadas en los laboratorios de investigación que manipulan NMs (INSST, 2019).

El fundamento de las CSB clase I es similar al de una vitrina de gases en la que el aire procedente del exterior se introduce por la abertura frontal y es extraído al 100%, protegiendo al usuario. En este tipo de cabina, la velocidad del flujo de aspiración debe ser superior a 0,7 m/s y no sobrepasar 1 m/s.

Las CSB clase II (figura 4) protegen tanto al usuario como al producto manipulado ya que el área de trabajo es recorrida por un flujo laminar descendente de aire filtrado. La protección del trabajador se consigue mediante una barrera

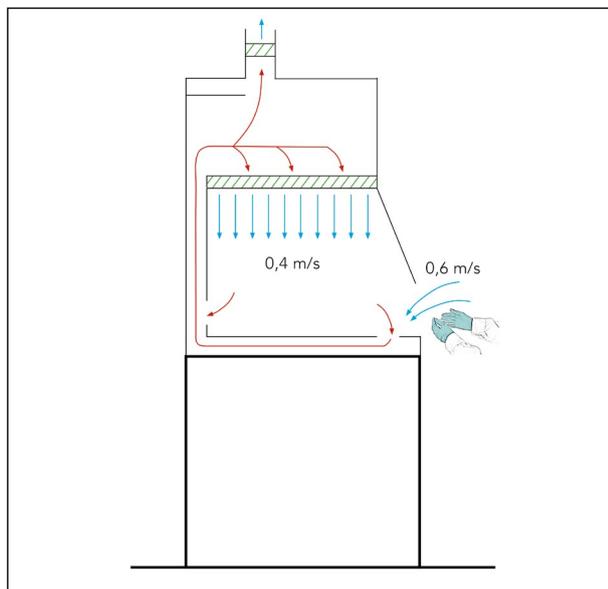


Figura 4. Esquema de funcionamiento de una cabina de seguridad biológica clase II con recirculación del aire.

de aire que se forma a partir de la entrada del aire desde el exterior de forma similar a la CSB clase I. Los flujos de aire son conducidos a través de unas rejillas situadas en la parte anterior y posterior del área de trabajo a un plenum, desde el cual el aire es redistribuido. Un tanto por ciento del mismo es extraído al exterior, mientras que el resto, se filtra y se recircula sobre el área de trabajo. Además de las cabinas que recirculan el aire, en el mercado hay CSB clase II en las que el 100 % del aire se extrae al exterior.

Las CSB clase III están herméticamente selladas, separando completamente al usuario del trabajo que esté realizando mediante un panel frontal y la manipulación del producto se efectúa a través de unos guantes de goma. En este tipo de cabina, cuando se reemplazan los guantes desechables, la velocidad del flujo de aspiración debe ser igual o superior a 0,7 m/s.

Recientemente, se han comercializado cabinas diseñadas específicamente para la manipulación de NMs (figura 5), caracterizadas por un flujo multilaminar vertical a muy baja velocidad del aire (< 0,2 m/s), evitando así la generación de turbulencias y el riesgo de liberación de NMs al exterior, y por disponer de un sistema de doble filtrado del aire con salida al exterior. Estas cabinas se han ensayado con NMs y proporcionan seguridad tanto al usuario como al producto. La protección del trabajador se consigue mediante una barrera de aire que se forma a partir de la entrada del aire desde el exterior, similar a las CSB clase I y II y, además disponen de un flujo de aire laminar en la parte exterior de la zona de trabajo de la cabina. La protección del producto se logra por el flujo laminar descendente y la baja velocidad del aire de la cabina que permite que las propiedades físicas de la muestra no se alteren, evitando la dispersión y aglomeración de la misma.

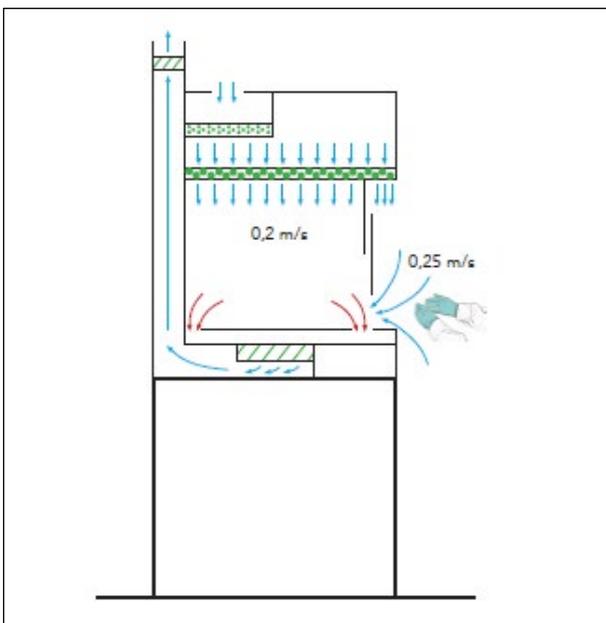


Figura 5. Esquema de funcionamiento de una cabina diseñada específicamente para manipular NMs.

Un aspecto que conviene aclarar en relación con las cabinas de extracción es que a algunas de ellas se las denomina “cabinas de flujo laminar” debido a que están dotadas de este tipo de flujo. Sin embargo, hay que resaltar que, las cabinas de flujo laminar, bien horizontal o vertical, están diseñadas para trabajar con sustan-

cias que, sin ser peligrosas, requieren un ambiente libre de partículas para proteger al producto, por lo que no se recomienda su uso con productos peligrosos como pueden ser los NMs. La figura 6 muestra el esquema de funcionamiento de una cabina de flujo laminar vertical.

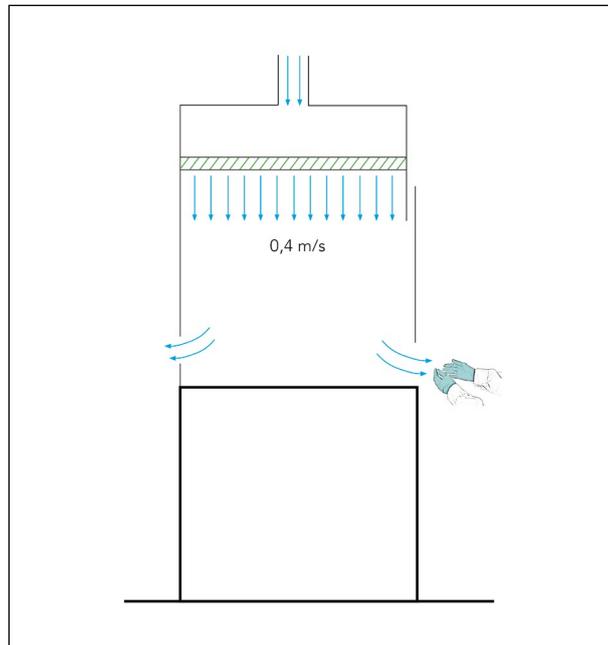


Figura 6. Esquema de funcionamiento de una cabina de flujo laminar vertical.

Selección de la cabina

Las CBS clase II y las cabinas diseñadas específicamente para la manipulación de NMs ofrecen protección tanto al usuario como al producto, mientras que las vitrinas de gases protegen solamente al usuario.

La selección de la cabina a utilizar debe basarse en los siguientes criterios:

- toxicidad del material manipulado,
- posible generación de aerosoles debido a las técnicas manipulativas empleadas, y
- características del NM (facilidad para dispersarse).

Recomendaciones de utilización

- El usuario debe recibir formación en el uso de la cabina y disponer del manual de instrucciones del fabricante en el idioma oficial del país.
- Se debe comprobar que el indicador de flujo de la cabina, si existe, funciona correctamente y no presenta situación de alarma.
- En el interior de la cabina solamente se debe disponer del material indispensable para llevar a cabo el trabajo.
- La abertura de la cabina debe reducirse al mínimo espacio compatible con el trabajo que se va a realizar.
- Para evitar turbulencias, se recomienda que el usuario realice movimientos lentos dentro de la cabina.
- En caso de que haya que instalar equipos o material dentro de la cabina, estos no deben colocarse contra las paredes de la misma. En estos casos, se recomienda realizar en estas condiciones los ensayos de funcionamiento de la cabina.

Campanas de extracción

La campana de extracción debe encerrar lo más posible el foco de emisión. Para ello, pueden utilizarse deflectores o protecciones laterales. El caudal de aspiración debe ajustarse a la actividad y a la presencia de corrientes de aire. Un aspecto importante a considerar es que la campana debe situarse tan cerca del foco contaminante como sea posible, debido a que el caudal de aspiración necesario aumenta con el cuadrado de la distancia al foco. Asimismo, se tendrá en cuenta la velocidad de captura que es la velocidad mínima del aire, producida por la campana, que es necesaria para capturar y dirigir hacia ella el contaminante.

Para procesos a baja velocidad, en aire moderadamente tranquilo (p. ej. llenado intermitente de recipientes), una velocidad de captura de entre 0,5-1 m/s puede ser suficiente (Goberna *et al.*, 1992). Sin embargo, en los casos en los que se utilice más energía (p. ej. desbarbado, chorreado abrasivo) y, por tanto, se generen más partículas o haya corrientes de aire, la velocidad tendrá que ser superior, entre 2,5-10 m/s. En caso de trabajar en vía húmeda, la velocidad de aspiración tiene que ser mayor.

Asimismo, se recomienda comprobar que la campana de extracción es eficaz y está colocada correctamente. Si no está bien posicionada, puede arrastrar partículas hacia la zona de respiración del trabajador.

Desde un punto de vista preventivo y considerando las características de los NMs, se recomienda que los sistemas de extracción eliminen el aire extraído al exterior y no lo recirculen al área de trabajo. Asimismo, para evitar emisiones de NMs al exterior, los sistemas de extracción deben disponer de filtros HEPA (*High Efficiency Particle Air*) de clase H14. En caso de que en las operaciones con NMs se generen gases o vapores, además de los filtros HEPA, se debe disponer de filtros que retengan dichos contaminantes.

Un aspecto importante a considerar cuando se implementa un sistema de extracción localizada es que continúe siendo eficiente a lo largo del tiempo. Para ello, es necesario establecer un programa de mantenimiento preventivo que incluya las recomendaciones del fabricante o suministrador y, guardar un registro de dichas revisiones.

5. EXTREMAR LA LIMPIEZA

En los lugares de trabajo en los que se manipulan NMs hay que extremar la limpieza para evitar que los NMs depositados en las superficies puedan incorporarse de nuevo al aire, por lo que:

- Es importante limpiar los utensilios utilizados (filtros, espátulas, etc.) y superficies después de cada tarea. En el caso de objetos contaminados con suspensiones líquidas, hay que tener en cuenta que, al evaporarse el disolvente, el NM puede pasar al aire y ser inhalado. La limpieza de recipientes secos debe hacerse en una cabina de extracción. El agua utilizada para el lavado debe desecharse como material peligroso y no por el desagüe.
- Las superficies, paredes y suelos se limpiarán regularmente con paños húmedos desechables preferiblemente o utilizando aspiradores con filtro HEPA, H14 o superior. No usar medios que puedan producir la dispersión de los NMs (aire a presión, cepillos, mopas, trapos secos, etc.).
- Informar al personal trabajador que vaya a realizar la limpieza de la sala de estas pautas. Si este perso-

nal pertenece a otra empresa (p. ej. una empresa de limpieza), se deberá establecer la coordinación de actividades empresariales para que transmitan esta información a su personal trabajador.

- En caso de derrame, utilizar guantes para colocar un papel húmedo encima y evitar la dispersión del material. Si el derrame es en forma de polvo, utilizar también equipo de protección respiratoria (véase apartado 7).

6. GESTIÓN DE RESIDUOS

Los residuos contaminados con NMs deben tratarse como residuo peligroso y ser recogidos por empresas autorizadas. Se deben considerar como residuo:

- Papel o paños utilizados para limpiar.
- Equipos de protección individual de un sólo uso (p. ej. guantes, trajes de protección, mascarillas autofiltrantes).
- Filtros de los sistemas de extracción.
- Envases contaminados.
- Cualquier resto de suspensiones líquidas o restos sólidos.

Los residuos deben guardarse en doble contenedor (p. ej. doble bolsa sellada) y, en recipientes rígidos y herméticos, etiquetarse de forma clara, legible e indeleble, incluyendo el código de identificación del residuo, el nombre, dirección y teléfono del titular del residuo, fecha de envasado y naturaleza de los riesgos que presentan de acuerdo con el Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

En ningún caso, se deben tirar desechos líquidos ni suspensiones líquidas con NMs por el desagüe o material sólido contaminado con los residuos ordinarios.

7. EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL

Los equipos de protección individual (EPI), tal y como establece la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, se utilizarán cuando, una vez tomadas todas las medidas preventivas, siga habiendo riesgo de exposición. La selección de los mismos se realizará a partir de los resultados obtenidos en la evaluación de riesgos.

En el caso de los NMs, debe tenerse en cuenta que estos pueden permanecer en suspensión durante largos periodos de tiempo (días, semanas). Por tanto, el uso de EPI solamente durante el desarrollo de la actividad no garantiza la protección de los trabajadores en caso de que el NM se haya dispersado en el ambiente de trabajo. Asimismo, antes de acceder a otras secciones de las instalaciones, es importante quitarse los EPI en la zona seleccionada para ello. Dicha zona, en la medida de lo posible, deberá estar aislada y justo antes de la zona de manipulación y, dispondrá de contenedores para desechar los EPI de un sólo uso, y armarios para guardar los reutilizables.

Es muy importante que la retirada de los EPI se realice de una forma correcta y en el orden adecuado: en general, en primer lugar, la bata/traje de protección, a continuación, la protección ocular, seguida de la protección respiratoria y por último, los guantes. En caso de que se utilicen dos pares de guantes, el externo se quitará después de la bata/traje de protección y el interno, en último lugar tras la protección respiratoria. Nunca se deberán sacar los EPI reutilizables a otras zonas sin haberlos limpiado debidamente.

Protección respiratoria

- Los equipos de protección respiratoria (EPR) deben tener filtros para partículas del tipo P3.
- Cuando se utilice el NM junto con otro agente químico, por ejemplo, disolventes, utilizar filtros combinados para gases, vapores y partículas P3.
- En la selección del EPR (modelo y talla), es importante realizar la prueba de ajuste facial.

Protección dérmica y ocular

- Utilizar batas o trajes de protección química frente a partículas (Tipo 5), dependiendo de la actividad, cantidad y tipo de NM manipulado. Dejar las batas en el laboratorio para evitar la dispersión de NMs a otras zonas.
- En la selección del material, considerar los materiales “no tejidos” frente a los “tejidos” como el algodón.
- Utilizar guantes de protección química desechables. Si el contacto con el NM es prolongado, usar dos pares de guantes. En el caso de manipulación de suspensiones líquidas, el material tendrá que elegirse en función del disolvente empleado. En las operaciones de mecanizado, usar guantes apropiados para riesgo mecánico y térmico.
- Utilizar calzado cerrado de un material no permeable. En salas donde hay pulverización de NMs, usar calzos para evitar dispersar los NMs a otras zonas.
- Para la manipulación de NMs en estado sólido en operaciones en las que no se genere polvo, usar gafas de montura universal.
- En operaciones en las que se generen aerosoles, usar gafas de montura integral que no dispongan de sistema de ventilación o máscara completa (EPR).
- Para la manipulación de líquidos que contienen NMs, utilizar pantallas faciales con protección frente a salpicaduras.
- Para tareas de mecanizado, emplear gafas de montura integral con hermeticidad frente a partículas de polvo gruesas.

8. FORMACIÓN E INFORMACIÓN

Formar e informar regularmente a los trabajadores expuestos sobre:

- los riesgos potenciales de la exposición a los NMs que se utilizan,

- los procedimientos de trabajo para una manipulación segura,
- las medidas preventivas a adoptar,
- cómo utilizar y comprobar el buen funcionamiento de los sistemas de extracción localizada, y en caso contrario, cómo actuar,
- cómo realizar las comprobaciones previas al uso de los EPR y,
- el uso correcto de los EPI (almacenamiento, mantenimiento, limpieza).

Asimismo, se debe poner a su disposición las FDS en el idioma oficial del país.

9. VIGILANCIA DE LA SALUD

Se deberá informar al servicio de prevención que se está trabajando con NMs para que lo consideren en la vigilancia de la salud así como en la evaluación de riesgos y la planificación preventiva. Asimismo, es conveniente establecer un registro de los trabajadores que manipulan NMs, las características de estos y el tipo de operaciones que se realizan.

Actualmente, no existen protocolos específicos para la vigilancia de la salud de los trabajadores potencialmente expuestos a NMs, fundamentalmente, debido a que no hay información científica suficiente de sus efectos sobre la salud y, de los indicadores o biomarcadores de exposición o de efecto.

En cualquier caso, se aconseja prestar atención a los órganos que pueden verse afectados y realizar exámenes que incluyan pruebas de función pulmonar, renal, hepática o hematopoyética. Así, una revisión bibliográfica sobre programas de vigilancia médica a trabajadores expuestos a NMs indica que, las pruebas clínicas más empleadas son los test de Rayos-X y las espirometrías (Gulumian *et al.*, 2016). Por su parte, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo de EE. UU. (NIOSH) recomienda seguir los protocolos de vigilancia de la salud específicos para el agente químico que integre el NM o para el material en tamaño no nano (NIOSH, 2009).

En el caso de exposición a materiales fibrosos insolubles (HARN: *High Aspect Ratio Nanomaterials*), debido a su cierta similitud con las fibras de amianto, se podría aplicar el protocolo de vigilancia sanitaria específica para el amianto.

Estas recomendaciones deberán ser actualizadas conforme a los resultados de nuevas investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

DONALDSON, K. *et al.*, 2003. Pulmonary toxicity of carbon nanotubes and asbestos - Similarities and differences. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65:2078-2086.

DONALDSON, K., 2003. Current hypotheses on the mechanisms of toxicity of ultrafine particles. *Ann. Ist. Super Sanita*. 39:405-10.

ECHA, 2019. Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Appendix R.6-1 for nanoforms applicable to the Guidance on QSARs and Grouping of Chemicals. Disponible en: https://echa.europa.eu/documents/10162/23036412/appendix_r6_nanomaterials_en.pdf/71ad76f0-ab4c-fb04-acba-074cf045eaaa

GAeF, 2020. Position paper of the Gesellschaft für Aerosolforschung on understanding the role of aerosol particles in SARS-CoV-2 infection. Disponible en: https://ae00780f-bbdd-47b2-aa10-e1dc2cdeb6dd.filesusr.com/ugd/fab12b_0b-691414cfb344fe96d4b44e6f44a5ab.pdf

GOBERNA, R. *et al.*, 1992. Ventilación Industrial. Manual de recomendaciones prácticas para la prevención de riesgos profesionales. Generalitat Valenciana.

GULUMIAN, M. *et al.*, 2016. Systematic Review of Screening and Surveillance Programs to Protect Workers from Nanomaterials. PLoS ONE. 11(11).

ICRP, International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. Elsevier Health Sciences. ICRP Publication 66; 1994.

IARC, 2017. Some Nanomaterials and Some Fibres. IARC Monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. Volume 111. Disponible en: <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono111.pdf>

IARC, 2010. Carbon Black, Titanium Dioxide, and Talc. Volume 93. Disponible en: <https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono93.pdf>

INSST, 2019. Potencial exposición a NMs en entidades de I+D+i. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/catalogo-de-publicaciones/potencial-exposicion-a-nanomateriales-en-entidades-de-i-d-i-ano-2019>

LARESE FILON *et al.*, 2018. Regulatory Toxicology and Pharmacology 72: 310-322.

NIOSH, 2009. Current Intelligence Bulletin 60. Interim Guidance for Medical Screening and Hazard Surveillance for Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-116/pdfs/2009-116.pdf>

NSF/ANSI 49 - 2018. Biosafety Cabinetry: Design, Construction, Performance and Field Certification.

POLAND, C.A. *et al.*, 2008. Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. Nature Nanotechnology. 3:423-428.

Recomendación de la Comisión relativa a la definición de nanomaterial (2011/696/EU). Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011H0696>

Reglamento Delegado (UE) 2020/217 de la Comisión de 4 de octubre de 2019 que modifica, a efectos de su adaptación al progreso técnico y científico, el Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y que corrige dicho Reglamento.

Review of the Recommendation 2011/696/EU - Stakeholder consultation. Disponible en: https://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/review_en.htm

SCHULTE, A.P. *et al.*, 2019. Current state of knowledge on the health effects of engineered nanomaterials in workers: a systematic review of human studies and epidemiological investigations. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health. 45: 217-238.

UNE-EN 12469:2001. Biotecnología. Criterios de funcionamiento para las cabinas de seguridad microbiológica.

UNE-ISO/TR 12885:2010 IN. Nanotecnologías. Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías.