

Riesgos asociados a la nanotecnología

Risques liés a la nanotechnologie
Risks linked to nanotechnology

Redactores:

Maria Gràcia Rosell Farràs
Ingeniero Técnico Químico

Lluís Pujol Senovilla
Licenciado en Ciencias Físicas

CENTRO NACIONAL DE
CONDICIONES DE TRABAJO

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

A la definición general de nanotecnología como capacidad de manipular la materia para diseñar, obtener y aplicar nuevas estructuras y sistemas a escala nanométrica, la US National Nanotechnology Initiative añade que una tecnología sólo se puede definir como nanotecnología si cumple con las siguientes premisas:

1. Que la investigación y el desarrollo tecnológico se apliquen a estructuras cuya longitud esté comprendida entre 1 y 100 nanómetros (nm) al menos en una de sus dimensiones. Como $1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ (es decir, una millonésima de milímetro) se tratará frecuentemente de una precisión atómica o molecular.
2. Que se obtengan o utilicen estructuras, dispositivos y sistemas que presenten propiedades y funciones características como consecuencia de su dimensión nanométrica.
3. Que se tenga la capacidad de controlar o manipular a escala atómica.

Una de las características de las nanopartículas es que la relación entre el número de átomos superficiales y el tamaño de la partícula es de carácter exponencial. Por ello, las propiedades relacionadas con la superficie, como las eléctricas, mecánicas, magnéticas, ópticas o químicas de los nanomateriales son diferentes a las de los mismos materiales a escala no nanométrica. Esas propiedades juegan un papel importante en la toxicidad de estas partículas ultrafinas y es importante conocerlas para entender, predecir y gestionar el riesgo potencial que presentan para los trabajadores. Como ocurre con cualquier nuevo material, no se dispone de datos toxicológicos suficientes sobre los efectos producidos en trabajadores expuestos, existiendo en este caso mayor incertidumbre por las propiedades anteriormente expuestas.

2. CLASIFICACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS

No existe una definición única de nanopartícula aunque la mayoría de autores convienen que las nanopartículas son porciones de materia diferenciadas del medio donde se encuentran y cuya longitud, al menos en una de sus dimensiones está entre 1 y 100 nm. A partir de esta definición las nanopartículas pueden clasificarse en las tres grandes categorías que se comentan a continuación.

Nanopartículas de origen natural

Algunas son de origen biológico, como por ejemplo muchos virus y bacterias y otras son de origen mineral o medioambiental como las que contiene el polvo de arena del desierto o las nieblas y humos derivados de la actividad volcánica o de los fuegos forestales.

Nanopartículas generadas por la actividad humana

Las nanopartículas consecuencia de la actividad humana pueden ser generadas de forma involuntaria o deliberada.

Las nanopartículas producidas de *forma involuntaria* son las que se producen en ciertos procesos industriales bien conocidos, tales como la pirolisis a la llama del negro de carbono, producción de materiales a gran escala por procedimientos a altas temperaturas (como el humo de sílice, partículas ultrafinas de óxido de titanio y metales ultrafinos), procesos de combustión (diesel, carbón), obtención de pigmentos, o en procesos domésticos (barbacoas, humos de aceite).

Las nanopartículas *generadas deliberadamente* se producen mediante las llamadas *nanotecnologías*. Los mé-

todos para la obtención de nanopartículas son, a grandes rasgos, de dos tipos: los llamados “top-down”, en los que se llega a nanomateriales sometiendo materiales convencionales a diversos procesos y los “bottom-up” en los que se construyen nanopartículas a partir de átomos o moléculas. Son ejemplos de ellas las derivadas de la arcilla para reforzar y aumentar la resistencia del plástico, utilizadas en la fabricación de resinas para acabados del exterior de vehículos, y las que modifican propiedades ópticas de algunos materiales que se utilizan en cosmética.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS NANOMATERIALES

En función del número de dimensiones que en la estructura considerada tengan carácter nanométrico, los nanomateriales también se pueden clasificar en:

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

4. EJEMPLOS DE NANOMATERIALES Y PROPIEDADES

Se comentan a continuación algunos de los nanomateriales más representativos.

Fullerenos

Son estructuras cerradas formadas por átomos de carbono dispuestos en forma de pentágonos y hexágonos a modo de “nanobalones” de fútbol. Entre sus propiedades físicas destaca la de que son capaces de resistir a presiones extremas y recuperar su forma original cuando cesa la presión. Una importante aplicación potencial de los fullerenos está en el campo de los lubricantes (figura 1).

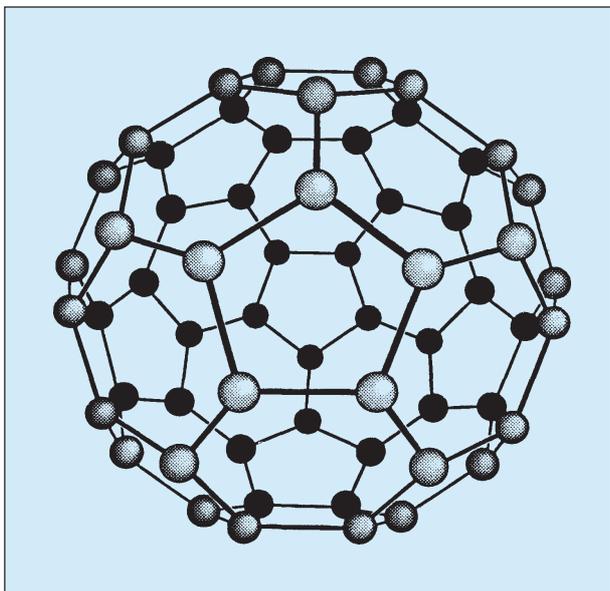


Figura 1. Fullerenos

Nanotubos de carbono

Pueden describirse como un tubo cuya pared es una malla de agujeros hexagonales. También es posible obtener nanotubos de varias capas, a modo de varios tubos concéntricos. Son muy destacables sus propiedades eléctricas y mecánicas. Son grandes superconductores capaces de resistir el paso de corrientes elevadísimas, de densidades de corriente de hasta mil millones de amperios por metro cuadrado, y, por otra parte su resistencia mecánica es sesenta veces superior a la de los mejores aceros; a su vez son ligeros y flexibles ya que su peso es más de seis veces inferior. También es de destacar la estabilidad de sus propiedades térmicas y químicas. Ver la figura 2.

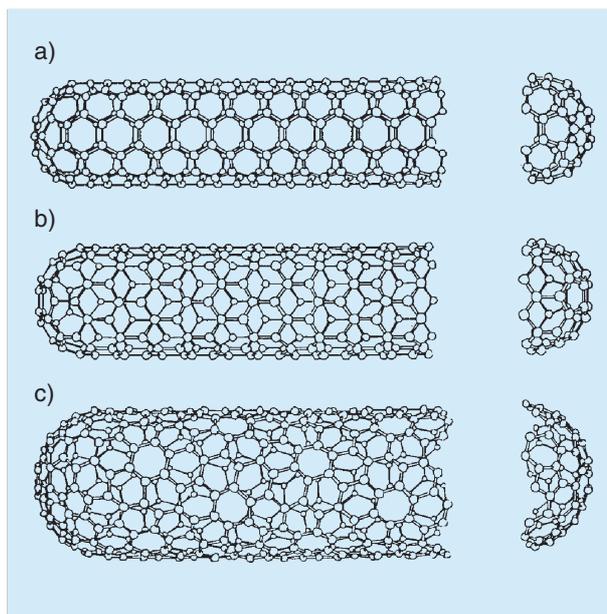


Figura 2. Nanotubos de carbono

Nanohilos

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

Nanoespumas de carbono

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

5. RIESGOS DE LAS NANOPARTÍCULAS

La acción preventiva frente a los riesgos derivados de las nanopartículas aborda dos aspectos: la prevención de incendios y explosiones, que se deriva de su condición de partículas materiales en el ambiente de trabajo; y la vinculada a su posible toxicidad. En el esquema de la figura 3 se describen las distintas fases de la identificación, evaluación y caracterización del riesgo de los nanomateriales.

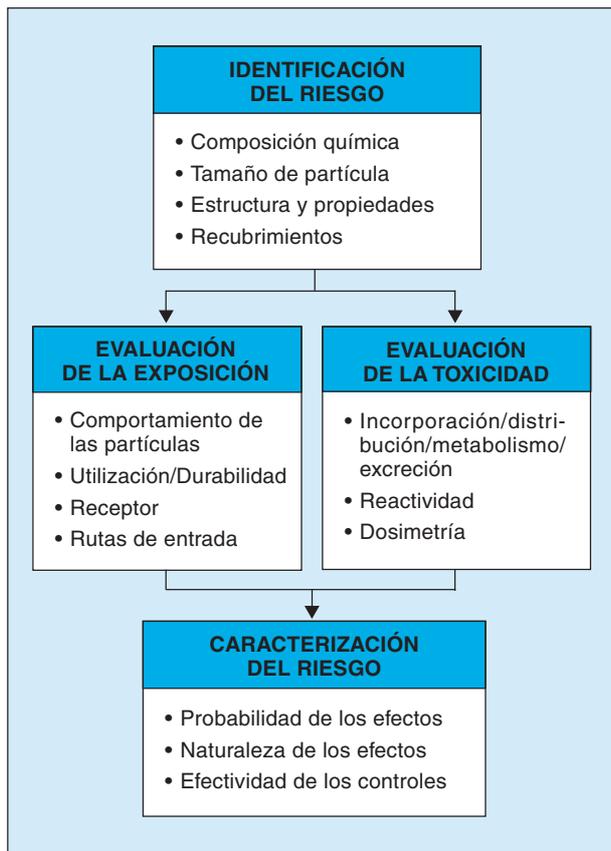


Figura 3. Fases de la identificación, evaluación y caracterización del riesgo de los nanomateriales

Riesgo de incendio y explosión

A la espera de disponer de mayor información, la extrapolación directa a las nanopartículas de las medidas adoptadas en la prevención de explosiones de polvos finos y ultrafinos (por ejemplo, ATEX), no ofrece garantías suficientes debido a los cambios que sufren las propiedades de las partículas al ingresar en la categoría de nanopartículas, derivados, como ya se ha comentado, del hecho de que el número de átomos superficiales en los nanomateriales es mucho mayor que en materiales convencionales. Según datos del Health and Safety Laboratory (HSL) del Reino Unido en el caso de polvos micrométricos, la gravedad de la explosión es mayor cuanto menor es el tamaño de la partícula, pero que precisamente debido a los cambios indicados, este resultado no puede extrapolarse a las nanopartículas. En aras del principio de precaución, y teniendo en cuenta que la energía mínima de ignición de un gas es inferior a la necesaria para la ignición de una nube de polvo, es lícito suponer que el riesgo de explosión e incendio asociado a una nube de nanopartículas, puede ser importante.

En consecuencia, como medidas de prevención frente a este riesgo en el tratamiento y almacenamiento de nanopartículas, se recomienda:

- Disponer de instalaciones eléctricas antiexplosivas y equipos eléctricos protegidos frente al polvo e incluso, en ciertos casos, que sean estancos para vapores.
- Seleccionar cuidadosamente los equipos contra incendios.
- Si es posible, obtener, manipular y almacenar los nanomateriales en un medio líquido.
- Manipular y almacenar los nanomateriales en atmósferas controladas.

- Envolver los nanomateriales en una capa protectora constituida por sales o diferentes polímeros que puedan eliminarse rápidamente antes la utilización del producto.

No obstante lo anterior debe tenerse muy en cuenta que son muy pocos los nanopulvos que se fabrican en cantidades para las que deba tenerse en cuenta el riesgo de explosión. Por regla general, las cantidades de nanomateriales que se fabrican y manipulan son del orden de los gramos y en consecuencia no pueden alcanzarse las concentraciones ambientales mínimas necesarias para que se presente el riesgo de explosión.

Toxicidad

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

En los puestos de trabajo la vía entrada más común de las nanopartículas en el organismo es la vía inhalatoria, especialmente si se trata de un material poco soluble, aunque no hay que descartar la dérmica y la ingestión.

Vía inhalatoria

Los nanomateriales inhalados, dependiendo de su tamaño, forma y composición química, son capaces de penetrar y depositarse en los diferentes compartimentos del aparato respiratorio, en la región extra-torácica incluyendo la boca, fosas nasales, la laringe y la faringe; la región traqueo-bronquial, de la tráquea a los bronquios; y la región alveolar que comprende los bronquiolos y los alvéolos. La deposición puede tener lugar como consecuencia de la sedimentación gravitatoria, la impactación inercial, la intercepción, de las partículas con la superficie de contacto; por fenómenos de difusión relacionados con los movimientos aleatorios de las partículas muy finas y por la atracción electrostática debida a su carga. Las partículas de alrededor de 300 nm son las que se depositan menos ya que son demasiado gruesas para que los fenómenos de difusión les puedan influir y, por otro lado, son demasiado pequeñas para que los fenómenos de impactación y sedimentación tengan influencia sobre ellas. A partir de este valor la deposición crece de manera significativa siendo la difusión el fenómeno predominante. Las partículas ultrafinas superiores a 10 nm se depositan mayoritariamente en la región alveolar y las inferiores a 10 nm se depositan principalmente en la región extratorácica y en una menor cantidad en la región traqueo bronquial. Ver figura 4. En estudios realizados con ratas se ha observado que pueden depositarse nanopartículas en la región nasal y que éstas, son capaces de trasladarse hasta el cerebro a través del nervio olfativo.

Vía dérmica

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

Vía digestiva

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

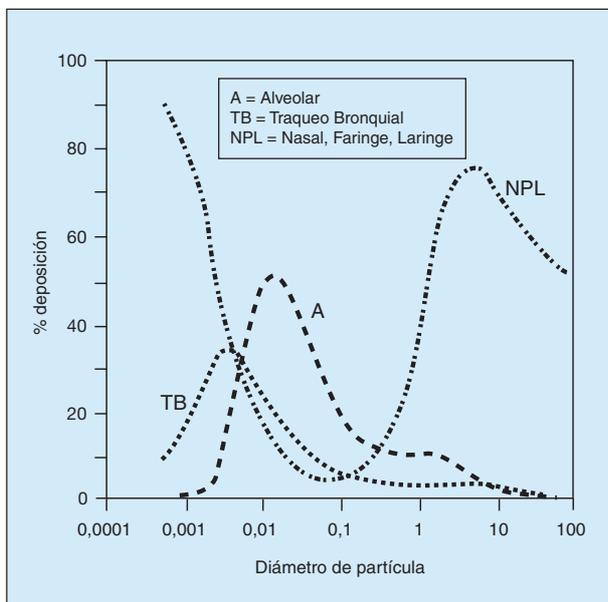


Figura 4. Fracciones de entrada por vía inhalatoria de las nanopartículas

6. CONTROL DE LA EXPOSICIÓN

Las medidas de prevención y protección se establecen a partir de la evaluación de riesgos y en la mayoría de los casos serán las mismas que las que se utilizarían para el control de la exposición aerosoles. Aunque estos métodos de control no han sido lo suficientemente estudiados para las nanopartículas, los pocos datos experimentales de los que se dispone hasta la fecha indican que la ventilación convencional junto con la filtración deberían ser efectivos para el control de estos materiales. Sin embargo hay que prestar especial atención a:

- La cantidad de materia (masa/nº de partículas). Mayor cantidad significa mayor riesgo de exposición.
- Si se trata de polvo seco o no. En el primer caso es más fácil que pueda dispersarse en el ambiente.
- El nivel de contención del proceso. Cuanto más cerrado, el riesgo de exposición es más bajo.
- El tiempo de exposición.
- La tendencia que presentan a aglomerarse.

Las medidas a tomar serán de tipo técnico, organizativo y protecciones personales.

Medidas técnicas

Son ejemplos de operaciones en el que el potencial de generación de aerosoles puede requerir medidas técnicas:

- Trabajos con nanomateriales en fase líquida durante las operaciones de trasvase, mezclas ó aquellas en que tiene lugar agitación elevada.
- Generación de partículas mediante corriente de gas.

- Manejo de polvos con nanoestructura.
- Mantenimiento de equipos y procesos de fabricación de nanomateriales.
- Limpieza de los sistemas de extracción utilizados en la captura de nanopartículas.

A continuación se resumen las principales medidas de carácter técnico, que no dejan de ser las tradicionales de la seguridad e higiene industrial.

Sustitución de las sustancias, procesos y equipos

El primer paso para el control del riesgo es la aplicación del principio de sustitución, aplicable también a los procesos (prioridad del húmedo frente al seco) y a equipos antiguos u obsoletos.

Diseño

Disponer de instalaciones seguras, teniendo en cuenta la reglamentación vigente, con el fin de eliminar situaciones de riesgo.

Aislamiento o encerramiento del proceso

El principal método de control para evitar emisiones de nanopartículas es el encerramiento del proceso. Las operaciones de riesgo deben realizarse preferiblemente en circuito cerrado; si ello no es posible, en locales cerrados y equipados con sistemas de ventilación que eviten el paso de la contaminación a otras áreas. Cuando el proceso genere mucha contaminación que no sea controlable debe procederse a aislar a los trabajadores que pueden utilizar sistemas de control remoto para controlar el proceso.

Debe tenerse en cuenta que, en caso de una fuga en el circuito cerrado o en el encerramiento del proceso, las nanopartículas se comportarán como un gas y se dispersarán llegando a cualquier lugar de la planta. Como ya se ha indicado anteriormente, con el paso del tiempo las nanopartículas se aglomeran (coagulación), dejando de ser nanopartículas dificultando su dispersión en el ambiente.

Se hallan descritos procedimientos de trabajo en circuito cerrado en la producción a escala nanométrica del negro de carbón, TiO₂ nanométricos, metales y óxidos de metales.

Ventilación

Cuando no se pueda trabajar en circuito cerrado la captación de estos contaminantes en el foco de emisión mediante la extracción localizada será, la opción más eficaz para evitar su propagación en el ambiente de trabajo y evitar la exposición de los trabajadores. Para los nanomateriales, las especificaciones y la calidad de estos sistemas de extracción debe ser similar a aquellos que se utilicen para gases, vapores y aerosoles. A pesar de ello, en algunos procesos es imposible evitar la presencia de nanopartículas en el ambiente, en estos casos la ventilación general por dilución puede controlar el nivel de contaminación ambiental de nanopartículas.

Las operaciones de limpieza deben realizarse mediante aspiración y antes de cualquier operación de mantenimiento el equipo debe de limpiarse con aspiración.

Un sistema de extracción, bien diseñado, con un filtro de partículas de alta eficacia HEPA (High Efficiency Particulate Air) debe ser efectivo para evitar que los nanomateriales pasen al ambiente. Es condición indispensable de que el filtro esté bien anclado al soporte, ya

que sino, la eficacia de filtración será muy baja. Es preciso disponer de medidas de control para garantizar la eficacia del sistema.

Recirculación del aire y filtración

La filtración del aire recirculado o su descarga al exterior juegan un papel importante en el control de la exposición a nanopartículas. Debe tenerse en cuenta que los filtros HEPA presentan una eficacia superior al 99,97% para partículas de un tamaño medio de 0,3 μm , pudiendo, las partículas que son más pequeñas que la malla del filtro, ser capturadas por diferentes mecanismos tales como la difusión, intercepción, impactación, sedimentación, o fuerzas electrostáticas. La difusión browniana, causante de las colisiones entre el aire y las nanopartículas crea un movimiento al azar de los nanomateriales que incrementa la posibilidad de que puedan chocar o contactar con el filtro, favoreciendo la filtración de las mismas y cuando las partículas se adhieren a la superficie del filtro quedan retenidas eficazmente por fuerzas de Wan der Waals. Todos estos mecanismos deberían asegurar la filtración eficaz de las nanopartículas mediante los filtros HEPA, aunque está descrito que su eficacia decrece para partículas inferiores a 2nm.

Medidas organizativas

Prácticas de trabajo seguras

Algunas normas de trabajo como las que se detallan a continuación pueden ayudar a minimizar la exposición a nanomateriales:

- No guardar o consumir comida y bebidas en el puesto de trabajo.
- Prohibir la aplicación de cosméticos en lugares donde se manipulen, usen o almacenen nanomateriales.
- Disponer de lavabos para lavarse las manos y promover los hábitos de utilizarlos antes de comer o al dejar el puesto de trabajo.
- Quitarse la ropa de protección o batas para acceder a otras áreas de trabajo como administración, cafetería, sala de relax, etc.
- Facilitar las duchas y el cambio de ropa para prevenir la contaminación de otras áreas de forma inadvertida debida al transporte de los nanomateriales a través de la ropa y de la piel
- El personal deberá evitar tocarse la cara u otras partes del cuerpo expuestas con los dedos contaminados. El uso de EPI, como máscaras, puede ayudar a evitar el potencial de transferencia de los nanomateriales. La exposición por ingestión puede ser consecuencia del contacto entre mano y boca por tanto todas las estrategias para reducir la exposición dérmica también reducirán la exposición por ingestión.

- Limpiar el área de trabajo como mínimo al final de la jornada laboral utilizando sistemas de aspiración dotados de filtros HEPA y sistemas de barrido húmedos.

Protecciones personales

Dado que la *exposición dérmica* a nanopartículas puede conducir a la penetración directa de éstas través de la epidermis, es necesario tomar medidas para evitar esta exposición a través de la piel utilizando guantes adecuados, tanto cuando se manejen nanopartículas en estado sólido como en solución y fase gas. Los guantes utilizados cuando las nanopartículas están en suspensión en un líquido deben tener además una buena resistencia al mismo. Si se prevé un contacto prolongado deberían utilizarse dobles guantes, dado que la resistencia química del guante puede variar dependiendo del fabricante, modelo y espesor. Por lo tanto es recomendable consultar las tablas del propio fabricante.

Si se aplican adecuadamente las medidas técnicas expuestas, es poco probable que sean necesarias *protecciones respiratorias*. En todo caso, su utilización debe basarse en el criterio profesional y en los resultados de la evaluación de riesgos, y teniendo en cuenta que se utilizan como último recurso. Cuando se emplean equipos dependientes del medio ambiente, es la filtración el mecanismo de limpieza del aire antes de ser inhalado por el trabajador y hay que tener presente que, por un lado, la eficacia de la filtración no es absoluta y, por otro, que puede haber puntos de fuga por falta de estanqueidad, debido a que la sujeción de la máscara a la cara puede ser incorrecta o insuficiente, que el periodo de uso no es ilimitado y finalmente al tipo de actividad que puede dificultar su uso correcto. Por otro lado, tampoco hay que olvidar que la difusión de las nanopartículas es inferior a la de los gases.

Control de derrames

El control de derrames debe basarse en las buenas prácticas de trabajo junto con la reducción del riesgo de exposición y valorando la importancia de las diferentes rutas de entrada en el organismo. Las pautas a seguir son:

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

BIBLIOGRAFÍA

- (1) TINKLE SS. *et al* (2003)
Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease
Environ Health Perspect 111(9): 1202-1208
- (2) AITKEN RJ., CREELY KS., TRAN CL. (2004)
Nanoparticles: an occupational hygiene review
Research Report 274, UK Health and Safety Executive, www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr274.htm.

- (3) PRITCHARD DK., (2004)
Literature Review explosions hazards associated with nanopowders
Health & Safety Laboratory 17
http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2004/hsl04-12.pdf
- (4) US NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE
<http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>
- (5) OBERDÖRSTER E. (2004)
Manufactured nanomaterials(Fullerenes, C60) induce oxidative stress in brain of juvenile largemouth bass.
Environ. Health Perspect. 112(7)
- (6) IRSST (2006)
Communications Division Montreal (Québec)
Nanoparticles. Actual Knowledge about Occupational Health and Safety Risks and Prevention Measures
<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-470.pdf>
- (7) SIMON HODGSON 2006
An uncertain Business: The technical, social and commercial challenges presented by nanotechnology
http://www.responsiblenanocode.org/documents/Acona-Paper_07112006.pdf
- (8) OBERDÖRSTER G. *et al* (2004)
Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain
Inhal. Toxicol. 16: 437-445