

Exposición laboral a nanopartículas y medidas preventivas aplicables

Occupational exposure to nanoparticles and applicable preventive measures

Francisco José Navarro García

Técnico en Prevención de Riesgos Laborales e Ingeniero
en Diseño Industrial y Desarrollo de Productos
Solplast S.A.
fjnavarrog@solplast.com

SUMARIO: I. Introducción. II. Objetivos. III. Material y métodos. IV. ¿Qué son los nanomateriales? V. Nanomateriales de uso industrial. VI. Exposición laboral a nanomateriales. VII. Efectos para la salud de la exposición a nanomateriales. VIII. Evaluación de la exposición. IX. Cómo actuar en presencia de nanomateriales. X. Vigilancia de la salud. XI. Consideraciones finales. XII. Bibliografía.

RESUMEN. Desde principios de los años 2000 se ha producido un importante auge en la utilización de los nanomateriales por parte de la industria en ámbitos tan distintos como la alimentación, la construcción, la cosmética, la electrónica o la medicina. Esto es debido a las extraordinarias propiedades de este tipo de materiales, los cuales pueden ser utilizados como catalizadores, filtros, relleno o potenciadores de crecimiento, siendo por tanto un producto extremadamente versátil. Trabajar en la nano escala aporta una gran cantidad de ventajas, pero todo beneficio tiene un precio a pagar, y en este caso es la aparición de nuevos riesgos potenciales que no existirían al manipular estos materiales en su escala convencional.

Los nanomateriales pueden ser hallados tanto en la naturaleza como en el ambiente laboral. Este artículo, al encontrarse enmarcado en el ámbito de la Prevención, pone el foco en aquellos que, debido a su fabricación o manipulación, van a dar lugar a una exposición laboral que deberá ser controlada mediante las medidas preventivas propuestas. El principal reto al que este trabajo se enfrenta es la disgregación de la información relativa a la nanotecnología y la falta de consenso entre los distintos organismos que se han encargado de analizar en profundidad dichos materiales, por lo que

será necesaria una profunda investigación con el objetivo de elaborar una guía lo más útil posible para aquellos que, en su día a día, se puedan encontrar con este diminuto y desconocido aliado.

PALABRAS CLAVE: nanomaterial, nanotecnología, laboral, precaución, riesgo, enfermedad profesional.

ABSTRACT: The usage of nanomaterials has risen since the 2000s by different fields such as the food, cosmetic, electrical and healthcare industries. This is due to the extraordinary properties of these materials, which can be used as catalysts, filters, fillers or growth factors; being thus an extremely versatile material. Working within the nanoscale brings about different advantages. That said, there is a price to be paid; being in this case the appearance of new risk factors which wouldn't exist if these materials were used in their conventional scale.

Nanomaterials can be found both in nature and within a working environment. Since this article takes place within the Occupational Risk Prevention field, it focuses on the precautions that will be controlled when working with manufactured goods where nanomaterials are used. The main challenge that this thesis faces is the disgregation of the information relative to nanotechnology and the lack of consensus within the different organisms in charge of analyzing profoundly said materials. Because of this, it will be necessary to do an exhaustive research with the goal of creating a guide as useful as possible for those that, within their working hours, have to deal with these miniscule and unknown allies.

KEYWORDS: nanomaterial, nanotechnology, labour, precaution, risk, occupational disease.

I. Introducción

La **nanotecnología**¹ es el estudio, descubrimiento y comprensión de la materia donde las propiedades que se manifiestan dependientes de su tamaño y su estructura, predominantemente en la nano escala (rango de longitud aproximado de entre 1 y 100 nanómetros), difieren de las asociadas con átomos individuales, moléculas o la extrapolación de tamaños mayores del mismo material.

Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT): «*En el 2020, aproximadamente el 20 % de todos los productos manufacturados en el mundo se basarán en cierta medida en la utilización de la nanotecnología*».

La nanotecnología ha pasado rápidamente de ser utilizada en un entorno puramente científico y de investigación, a tener una infinidad de aplicaciones en la industria, desde la agricultura, alimentación, medicina, electrónica, industria farmacéutica o cosmética.

1 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). (2023). *Nanotechnologies -Vocabulary. Part 1: Core terms*. ISO/TS 80004-1:2023.

Este nuevo interés es debido a que al trabajar con materiales cuyo tamaño se sitúa en la nano escala, estos adquieren una serie de propiedades que difieren enormemente de las que poseían en su tamaño original. Al incorporarlos a productos se pueden conseguir ventajas tales como:

- Disminuir el peso de productos, como viene siendo frecuente su utilización en el mundo de la automoción o en el deporte de alto rendimiento.
- Reducir el tamaño de los equipos, principalmente en el campo de la electrónica.
- Conseguir un mejor rendimiento de productos ya existentes, como una mayor durabilidad, resistencia térmica o eléctrica, o cambiar los acabados superficiales.

Como ejemplo, destaca el caso del oro (Au) que, en su tamaño habitual, es un material conductor y no magnético, y que químicamente se comporta de forma inerte. En cambio, al trabajar con el nano-oro, sus propiedades varían de una forma sorprendente: en tamaños de 1-3nm pierde su conductividad, en tamaños inferiores a 3nm se vuelve magnético y, además, pasa a ser un material inestable, lo que le confiere propiedades explosivas que lo convierten en un excelente catalizador.

Lo más llamativo respecto a la nanotecnología es que precisamente aquellas propiedades nuevas que adquieren los materiales y que determinan la gran variedad de usos, de igual manera, suponen una gran amenaza tanto desde el punto de vista de la salud como a nivel medio ambiental. En este sentido, se produce un enorme desequilibrio ya que las industrias han invertido muchos recursos en desarrollar nuevas tecnologías relacionadas con los nanomateriales, pero los estudios para conocer los riesgos del manejo y generación de residuos de estos productos representan una ínfima parte, y se desconoce cómo pueden afectar en el futuro a aquellos elementos relacionados con ellos.

Existen documentos específicos publicados sobre terminología básica, como pueden ser: Nanotecnologías. Vocabulario. Parte 1: Vocabulario fundamental (ISO 80004-1:2023) o Nanotecnologías. Vocabulario. Parte 2: Nano-objetos (ISO 80004-2:2023).

Pero en lo referente a los métodos de cuantificación que permitan realizar una adecuada evaluación de riesgos, la información es muy escasa, aunque sí existe **normativa** general de seguridad y salud en el trabajo de aplicación a los nanomateriales, donde cabe destacar:

- La Ley de Prevención de Riesgos Laborales (LPRL) y el Reglamento de los Servicios de Prevención (RSP).
- Normativas específicas de desarrollo de la LPRL que puedan aplicarse por la semejanza de sus características: el Real Decreto 374/2001 (de agentes químicos), el Real Decreto 1215/1997 (de equipos de trabajo), el Real Decreto 773/1997 (de equipos de protección individual), el Real Decreto 349/2003 (que modifica al RD 665/1997 de agentes cancerígenos) y el Real Decreto 681/2003 (de atmósferas explosivas).
- En el momento de su comercialización y distribución se ven afectados por el Reglamento sobre Registro, Evaluación y Autorización de sustancias químicas (REACH) y el Reglamento sobre Clasificación, Envasado y Etiquetado de sustancias y mezclas (CLP).

- Como se ha mencionado anteriormente, las tecnologías de cuantificación y evaluación de sustancias aplicables a materiales fuera de la escala nano no son de aplicación directa a los nanomateriales, por ello, es necesaria una investigación profunda de dichos materiales ya que carecen de Límites de Exposición Profesional (LEP) armonizados y distintos organismos utilizan unos límites de referencia de elaboración propia.

Por tanto, es importante destacar que la medida adoptada de forma más extendida en lo referente a la nanotecnología es que, ante la falta de información y normativa específica, se mantendrá siempre el «Principio de precaución», es decir, los nanomateriales serán considerados como de la más alta peligrosidad a no ser que exista información que asegure lo contrario.

Gran parte de la normativa citada es aplicable únicamente a aquellos nanomateriales que han sido fabricados de forma intencional a nivel industrial, por tanto, aquellos que se encuentran en la naturaleza o que han sido creados de forma accidental escapan de este espectro y deben ser tratados de forma distinta. Pero no por ello deben de ser ignoradas este tipo de exposiciones y se deben adoptar todas las medidas necesarias para reducir al máximo el contacto entre los trabajadores y estos materiales.

Por último, se debe destacar que lo más fascinante de la nanotecnología es la rapidez con la que aparecen nuevas aplicaciones de esta, como fue el caso de su utilización para la detección del SARS-CoV-2 de una forma menos invasiva², así como las posibilidades a futuro de la fabricación de nanomateriales a partir de tecnologías más limpias tales como «*the Green Chemistry*»³.

II. Objetivos

De las cuatro especialidades que forman parte de la Prevención de Riesgos Laborales, esta publicación se centra especialmente en la Seguridad y en la Higiene Industrial, disciplinas de especial relevancia ante la investigación de una tecnología emergente como es el uso de los nanomateriales.

Se pretende dar a conocer el estado actual en que se encuentra la nanotecnología; en qué consiste, distintos tipos de materiales y qué podemos esperar de ellos en un futuro y, por otro lado, dar a aquellos que se ven expuestos día a día a las nanopartículas, aquellas herramientas que les serán de especial utilidad con el objetivo de evitar por completo la exposición o, en caso de que no sea posible, minimizarla cuanto sea posible.

En un ámbito de actuación tan específico resulta imprescindible conocer qué normativa es aplicable y, como ocurre en el caso de los nanomateriales, saber cómo actuar en los casos en

2 MOABELO, K., MARTIN, D., FADAKA, A., SIBUYI, N. (2021). «Nanotechnology-Based Strategies for Effective and Rapid Detection of SARS-CoV-2». *National Library of Medicine (NIH)*. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34947447/>

3 PAL, K., CHAKROBORTY, S., NATH, N. (2022). «Limitations of nanomaterials insights in green chemistry sustainable route: Review on novel applications». *Degruyter*. Disponible en: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/gps-2022-0081/html?lang=en>

que las fuentes a consultar no sean capaces de resolver todas nuestras dudas, debido a que las investigaciones desde el punto de vista de la seguridad y salud en el uso de las nanopartículas aún se encuentran en una etapa muy temprana.

Un aspecto clave para este artículo es el de la concienciación, ser capaces de identificar aquellos trabajos en que pueden estar presentes las nanopartículas y ser capaces de actuar en consecuencia, guardando las precauciones necesarias ante una potencial exposición a una sustancia de cuyos efectos para la salud o la seguridad aún no se conocen con certeza.

III. Material y métodos

Se ha realizado una revisión bibliográfica de artículos científicos publicados por organismos de reconocido prestigio tanto a nivel de la Prevención de Riesgos Laborales como en el mundo de los nanomateriales.

El punto de partida para localizar estos artículos han sido aquellas organizaciones como el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) o la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), ambas con sede en EE. UU., que son referencia a nivel mundial y pioneras en la investigación de los nanomateriales.

En España el principal centro de referencia en la Prevención de Riesgos Laborales es el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSST), que había publicado varias guías relacionadas con los nanomateriales, pero que debido a su fecha de publicación requieren de una revisión y actualización.

A partir de los anteriormente nombrados he podido encontrar otras instituciones que han publicado artículos científicos relacionados con las nanopartículas y que me han permitido profundizar y redactar una guía de especial utilidad para aquellos que se puedan ver expuestos a los nanomateriales.

Los idiomas de referencia para la selección de los artículos científicos han sido el español y el inglés, debido a que países de especial importancia como Alemania o Francia suelen traducir sus publicaciones al inglés. El resto de los idiomas han sido excluidos como fuente de investigación para este trabajo.

De los 48 artículos que fueron seleccionados inicialmente, sólo 21 cumplieron con los criterios de selección: aportar información relevante y que no fuera una transcripción directa de lo desarrollado por NIOSH y OSHA. Es importante destacar que, debido a la continua investigación que se realiza sobre los nanomateriales, muchos artículos quedan parcialmente obsoletos y requieren de una minuciosa revisión con el objetivo de que todo lo que vaya a ser mencionado en este artículo sea de máxima actualidad.

Aquellos artículos que han destacado por sus innovadoras aportaciones a la nanotecnología, ya sea debido a nuevos usos de los nanomateriales o aspectos sobre los riesgos relacionados con la seguridad o la salud de creación propia, han sido tratados con especial interés debido a que el uso de los nanomateriales se está incrementando a gran velocidad y se requieren de continuas actualizaciones sobre la forma de relacionarnos con las nanopartículas.

IV. ¿Qué son los nanomateriales?

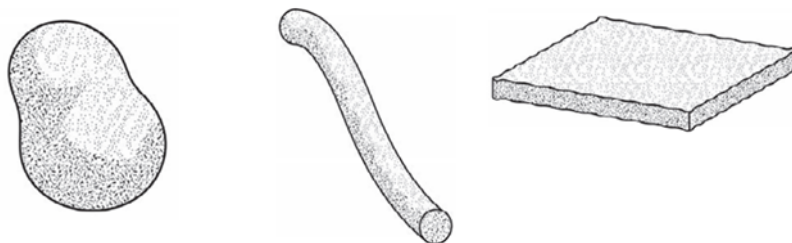
La Comisión Europea adoptó una recomendación⁴ relativa a la definición de **nanomaterial** que actualiza la de 2011, que estaba pendiente de revisión, entendiéndose como tal un material natural, accidental o fabricado, constituido por partículas sólidas que están presentes individualmente o como partículas constituyentes identificables en agregados o aglomerados, y en el que el 50 % o más de estas partículas en la granulometría numérica cumple, al menos, una de las condiciones siguientes:

- una o más dimensiones externas de la partícula se hallan en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm;
- la partícula tiene forma alargada, como la de una varilla, una fibra o un tubo, y dos de sus dimensiones externas son inferiores a 1 nm, mientras que la otra dimensión es superior a 100 nm;
- la partícula tiene forma de placa, y una de sus dimensiones externas es inferior a 1 nm, mientras que las otras dimensiones son superiores a 100 nm.

Para determinar la granulometría numérica, no será necesario tener en cuenta las partículas con, al menos, dos dimensiones externas ortogonales superiores a 100 μm .

No obstante, los materiales con una superficie específica por unidad de volumen

(< 6 m^2/cm^3) no serán considerados nanomateriales. La figura 4.1 muestra la apariencia de una nanopartícula, nanofibra y nanopláca.



a) nanopartícula
(3 dimensiones ext.
en la nanoescala)

b) nanofibra (2 dimensiones
ext. en la nanoescala)

c) nanopláca (1 dimensión
ext. en la nanoescala)

Figura 4.1. Apariencia de los nano-objetos. Fuente: ISO 80004-2:2023 (2023, p.6).

4 EUROPEAN COMMISSION (EC). (2022). *Commission Recommendation of 10 June 2022 on the definition of nanomaterial*. 2022/C 229/01.

Resulta complicado imaginar realmente a qué tamaño corresponde la nanoescala, a continuación, en la figura 4.2, se puede observar realmente a qué escala nos referimos al tratar con nanomateriales.

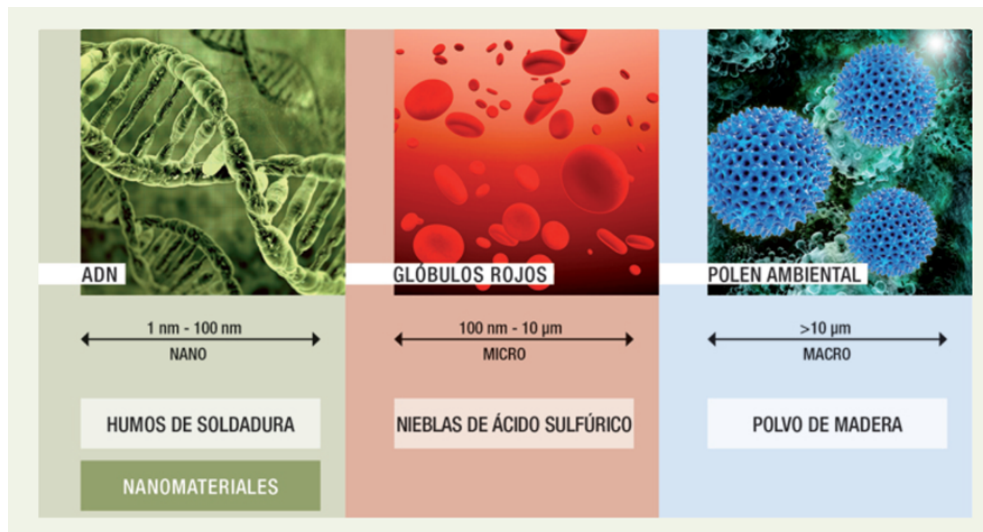


Figura 4.2. Comparativa del tamaño de nanopartículas.
Fuente: *Guía Nanomateriales - INNST (2015)*.

Según se ha mencionado anteriormente, en el entorno laboral los únicos nanomateriales que se ven afectados por la regulación son aquellos que han sido creados intencionalmente a nivel industrial, pero ésta no es la única fuente de generación de nanomateriales. A continuación, se indica el origen de dichos materiales:

- **Nanomateriales de origen natural:** en la naturaleza existen una serie de procesos que son una fuente de generación de nanomateriales (ver figura 4.3) principalmente de tipo inorgánico. Las erupciones volcánicas liberan gran cantidad de nanopartículas que rondan los 100 a 200 nm, por otra parte, en incendios forestales se han localizado nanopartículas de un tamaño entre 15 a 70 nm. Otros ejemplos de fuentes naturales son las relacionadas con la erosión del suelo o el polvo cósmico. El otro gran grupo de nanomateriales que provienen de origen natural son los orgánicos, que son generados por seres vivos, y que pueden encontrarse en formas tan distintas como bacterias o algas.

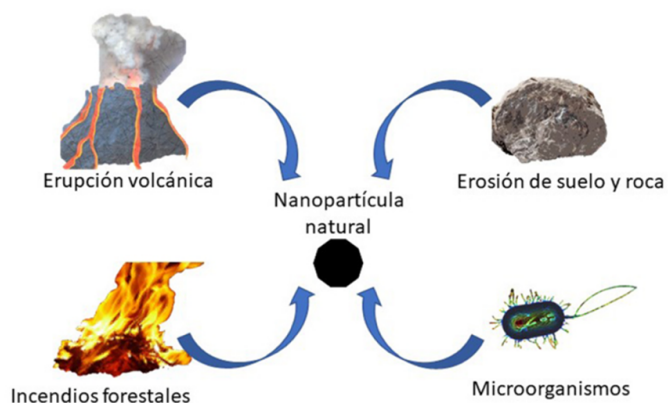


Figura 4.3. Nanomateriales de origen natural. Fuente: *Origen de las nanopartículas - INECOL (2022)*.

- **Nanomateriales creados de forma accidental o «partículas ultrafinas»:** este grupo es de gran importancia en el campo de la Prevención de Riesgos Laborales. Si bien escapan de parte de la regulación al no ser un proceso de creación de nanomateriales para uso industrial, cada día un gran número de personas se ven expuestos a estos y las consecuencias para su salud por una continua exposición pueden ser importantes, por lo que es clave conocer dónde puede haber fuentes accidentales de nanopartículas y dotar de la protección adecuada a aquellos que la necesiten.

A nivel industrial destacan como fuentes no intencionadas de generación de nanopartículas los humos de soldadura, el corte y mecanizado de metales y las reacciones de combustión (como motores diésel o gasolina). Es importante recordar que, aunque la preocupación principal se basa en su toxicidad, también pueden ser fuente de atmósferas explosivas o conductores eléctricos. La figura 4.4 muestra la generación de nanopartículas durante las operaciones de soldadura.



Figura 4.4. Generación de nanopartículas en humos de soldadura. Fuente: *PLYMOVENT (2024)*.

V. Nanomateriales de uso industrial

A continuación, se enumeran de forma no exhaustiva aquellos nanomateriales que se encuentran disponibles en el mercado en un listado que ha sido elaborado por la Comisión Europea⁵.

1. Nanomateriales no metálicos orgánicos

1.1. Sílice amorfa sintética (SiO₂)

Su principal uso es en la industria del papel, fundamentalmente en tintas, pinturas y adhesivos por su propiedad antideslizante, aunque tiene otras utilidades como en la industria alimentaria o textil. Su tamaño ronda entre los 5-100 nm.

La sílice respirable (aquella de tamaño mayor a 100 nm) es responsable de producir silicosis, una enfermedad profesional incapacitante. En exposiciones pequeñas de sílice en forma nano no se ha observado este fenómeno, por lo que no está catalogada como peligrosa por el REACH.

1.2. Dióxido de titanio (TiO₂)

Su uso principal es como pigmento para el color blanco. También es un efectivo filtro de las radiaciones ultravioleta, lo que unido a que en tamaño nano es transparente, es ampliamente utilizado en la fabricación de protectores solares.

Cabe destacar del dióxido de titanio que ha sido catalogado como grupo 2B «posible cancerígeno en humanos», y por parte de NIOSH se le ha dado un valor de 0.3 mg/m³ para las nanopartículas de TiO₂ (<100 nm).

1.3. Óxido de zinc (ZnO)

Muy similar al dióxido de titanio, es incoloro y es un efectivo protector de la radiación ultravioleta, aunque en un espectro distinto. Por sus propiedades antimicrobianas tiene utilidades como autolimpiador.

Ha sido catalogado como H410: muy tóxico para la vida acuática con efectos duraderos a largo plazo, por lo que la correcta gestión de sus residuos es fundamental.

1.4. Óxido de aluminio (Al₂O₃)

Ampliamente utilizado como relleno para polímeros y en la fabricación de neumáticos por su gran resistencia a la abrasión. Ha sido clasificado con una baja toxicidad, pero a grandes cantidades puede producir inflamaciones pulmonares.

5 EUROPEAN COMMISSION (EC). (2012). *Types and uses of nanomaterials, including safety aspects*. COM (2012) 288.

2. Metales y aleaciones metálicas

2.1. Oro (Au)

Utilizado principalmente con fines médicos, especialmente en aplicaciones in-vitro. Puede producir inflamación pulmonar y tiende a acumularse en el hígado. Pero no está catalogado como especialmente peligroso porque habitualmente suele ir incorporado a una matriz.

2.2. Plata (Ag)

Tradicionalmente ha sido utilizado en la fotografía, aunque actualmente destaca por sus propiedades antimicrobianas. Ha sido catalogado por el REACH como H400 y H410 (muy tóxico para la vida acuática con efectos duraderos a largo plazo), por lo que el correcto manejo de sus residuos es fundamental.

2.3. Otros nanomateriales metálicos

Destaca el platino por su uso en la industria electrónica y el cobre en industria electrónica y en la fabricación de tintas.

3. Nanomateriales con base de carbono

3.1. Fullerenos

Tienen forma esférica formada por unos 60 átomos de carbono con un diámetro de alrededor de 0.71 nm. Son utilizados en mercados muy especializados como equipamiento deportivo de alto nivel, cosmética o aplicaciones médicas. Los estudios actuales sugieren que pueden producir inflamaciones pulmonares, citotoxicidad y daño a los tejidos.

3.2. Nanotubos y nanofibras de carbono

Presentan una elevada resistencia térmica y conductividad eléctrica, así como una considerable resistencia mecánica. Su uso más frecuente consiste en conferir propiedades eléctricas a polímeros, también pueden ser utilizados como aditivos. Han sido clasificados por varios estudios como H319 (causante de irritación grave ocular) y H335 (puede causar irritación respiratoria).

3.3. Negro de humo

Es un polvo negro constituido principalmente de carbono. Su principal uso es en la fabricación de neumáticos debido a que aumenta la resistencia de la goma. Ha sido catalogado por el REACH como H351 (sospechoso de provocar cáncer).

3.4. Grafeno

Se forma como una estructura bidimensional constituida por nanoplacas. Posee una elevada dureza, elasticidad y flexibilidad. Además de ser un buen conductor térmico y eléctrico, sus principales utilidades son en aplicaciones médicas al ser un producto biocompatible.

4. Nanopolímeros y dendrímeros

Para fabricar polímeros se usan numerosos nanomateriales. La mayor parte de estos agentes se encuentran en investigación inicial en una etapa muy temprana de desarrollo por lo que la información es muy reducida.

5. Puntos cuánticos

Los puntos cuánticos son semiconductores que destacan por sus características electrónicas. Están compuestos principalmente de seleniuro de cadmio, sulfuro de cadmio, arseniuro de indio y fosfuro de indio. Se usan en pequeñas cantidades en informática, análisis biológico, dispositivos fotovoltaicos y en emisores y fotodetectores.

6. Nanoarcillas

Son nanopartículas de silicatos minerales estratificados como montmorillonita, bentonita, caolinita, hectorita y halloysita. Se utilizan principalmente en polímeros nanocompuestos, pinturas, tintas, cosmética y en tratamiento de residuos. Al producirse varias de estas en la naturaleza, algunas están exentas de la necesidad de ser registradas.

La figura 5.1 muestra distintos nanomateriales de uso en la industria.

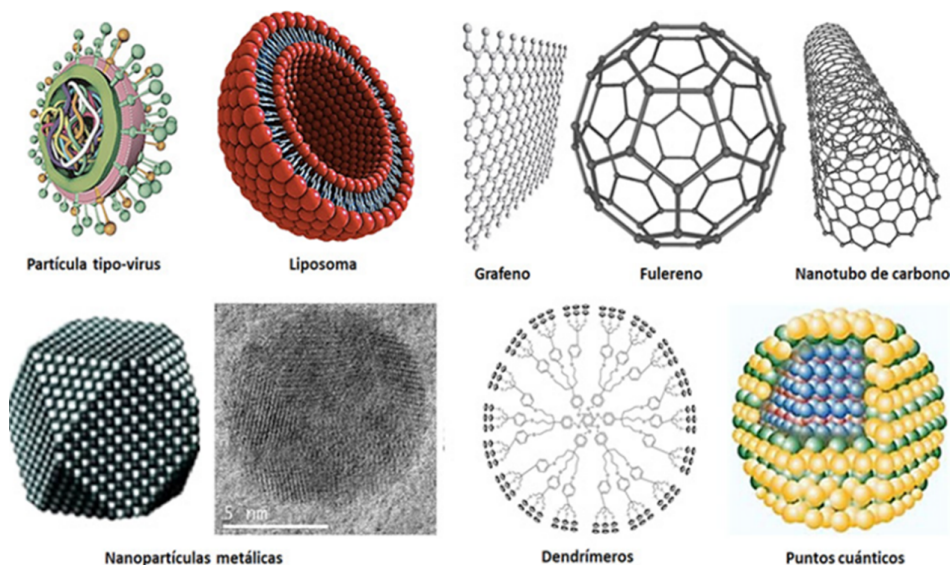


Figura 5.1. Tipos de nanomateriales de uso industrial. Fuente: SCIELO (2020).

VI. Exposición laboral a nanomateriales

Se han comentado anteriormente las posibles consecuencias para la seguridad y la salud que puede tener la exposición a nanomateriales. Es por tanto clave la etapa de identificación de las situaciones de riesgo, así como las medidas que hay que implantar para su control. A continuación, se indican los distintos procesos o actividades que pueden dar lugar a exposición laboral a nanomateriales.

1. Procesos de fabricación de nanomateriales

Ya sea a nivel de laboratorio o a nivel industrial, los métodos de fabricación de nanomateriales se dividen en dos procesos opuestos⁶:

- **Método de arriba hacia abajo (*top-down*):** es un proceso relativamente simple; se parte de material en bruto (tamaño variable desde micras a grandes piezas), y mediante procesos físicos o químicos se rompen hasta conseguir el tamaño deseado de la nanoescala. Los métodos descendentes más utilizados son fotolitografía, litografía por nanoimpresión (NIL), litografía por haz de electrones (EBL), grabado con iones reactivos (RIE) y grabado con iones reactivos profundos (DRIE).
- **Método de abajo hacia arriba (*bottom-up*):** se parte desde átomos o moléculas, y mediante procesos físicos o químicos se unen creando nanoestructuras. Este proceso crea las estructuras más resistentes y con propiedades más atractivas, pero es más complicado que el top-down. Tres de los métodos ascendentes más comunes son la deposición química de vapor (CVD), la deposición física de vapor (PVD) y la deposición de capas atómicas (ALD).

Ambos métodos tienen tareas en común donde puede producirse la exposición laboral a los nanomateriales, tales como, recuperación de material (limpieza y recolección), envasado del material (pesada, vertido, mezcla o tamizado) o posibles fugas durante el proceso.

2. Fabricación de productos que contienen nanomateriales

Actualmente una gran cantidad de productos incorporan durante su proceso de fabricación la nanotecnología, a continuación, se muestran una serie de ejemplos de industrias que frecuentemente los utilizan.

6 EUROPEAN COMMISSION (EC). (2007). *A European strategy for nanotechnology*. COM (2007) 505.

La tabla 6.1. muestra la utilización de los nanomateriales en diferentes sectores

Tabla 6.1. Utilización de nanomateriales en procesos productivos. Fuente: ¿Son los nanomateriales un riesgo para mi seguridad y salud en el trabajo - ISTAS (2015, p9)?

Utilización de nanomateriales en procesos productivos	
Sector	Proceso productivo o aplicación
Automóvil	Pintura y revestimientos para automóviles y aviones, piezas de automóviles reforzadas, aditivos para combustibles, baterías, neumáticos duraderos y reciclables, catalizadores. Electrónica tolerante a la radiación. Sistemas integrados de nanosensores. Sensores ópticos.
Biomedicina y productos farmacéuticos	Nanomateriales para la administración de fármacos, apertura remota por láser de luz de microcápsulas. Agentes antimicrobianos. Recubrimiento de tejidos para hospitales, mascarillas, batas quirúrgicas, catéteres, gasas de heridas, imagen molecular. Aditivos en los materiales dentales polimerizables, aditivo en el cemento óseo, SiO ₂ relleno de resina con nanocompuesto. Recubrimiento de implantes para la sustitución de articulaciones. Sistemas de diagnóstico, biosensores.
Química y materiales	Fabricación de pigmentos, recubrimientos de autolimpieza y antiarañazos, polvos cerámicos, inhibidores de corrosión, aislamiento térmico, tintas y cosméticos, materiales compuestos, papel adhesivo, fluidos magnéticos, superficies y tejidos antibacterianos, etc.
Cuidado personal y cosmética	Protectores solares, hidratantes faciales, pastas de dientes, barras de labios, tratamientos del acné, productos para el cuidado del bebé. Champú, acondicionador, secadores de pelo, planchas para el pelo.
Defensa	Trajés de batalla para los soldados, sistema de vigilancia de la salud y curación. Materiales neutralizantes para armas químicas.
Electrónica y comunicaciones	Electrónica molecular y fotónica. Piezas de ordenador, memorias y almacenamiento de información de alta densidad, catalizadores multifuncionales, microchips, sensores, pantallas planas, transistores de nanotubos de carbono, paneles de visualización de peso ligero, inhibidores de corrosión. Nanorrobots, operaciones automáticas en la nanoescala. Película conductora transparente basada en nanotubos para papel electrónico. Diodos láser, fibra óptica, interruptores, conductores, recubrimientos antiestáticos.
Energía	Células fotovoltaicas, baterías, materiales aislantes. Almacenamiento de hidrógeno en grafeno.
Medio ambiente	Modelización del clima. Plaguicidas y fertilizantes. Tratamiento de agua y filtros. Catalizadores para mejorar la calidad del aire.

Tabla 6.1. Utilización de nanomateriales en procesos productivos (continuación). Fuente: ¿Son los nanomateriales un riesgo para mi seguridad y salud en el trabajo - ISTAS (2015, p9)?

Utilización de nanomateriales en procesos productivos (continuación)	
Sector	Proceso productivo o aplicación
Alimentación	Envases de plástico para bloquear la radiación UV y proporcionar protección contra las bacterias. Botellas, cajas de cartón y películas que contienen nanocompuestos de arcilla, como barrera para el paso de gases o de los olores. Nanosensores de caducidad para detectar bacterias y otros contaminantes, como la salmonela, en una planta de envasado. Aditivos y conservantes.
Materiales deportivos	Revestimiento para botes y kayaks. Cañas de pescar hechas con resina epoxi. Raquetas de tenis, palos de golf, bates de béisbol, equipamiento para esquí, cuadros de bicicletas y componentes. Cera para esquíes, recubrimiento antivaho para gafas.
Materiales para la construcción	Recubrimientos superficiales para incrementar el aislamiento, retardantes de fuego, etc. Aditivos en cementos, acero, paneles, pavimentos, asfalto, etc.
Ingeniería	Recubrimientos protectores, rodamientos libres de lubricantes.
Productos domésticos	Productos antiolor, recubrimientos cerámicos para planchas, productos de limpieza para cristales, cerámica y metales.
Industria textil	Se están desarrollando productos textiles con nanomateriales para ser aplicados en campos diversos: deportivos, médicos, seguridad, recubrimientos superficiales para la construcción o el automóvil, etc.; ropa con propiedades antimanchas, ropa antiolor, etc.

En la incorporación de nanomateriales a este tipo de productos el riesgo de exposición laboral se produce de forma similar a los procesos de fabricación de nanomateriales. Principalmente se produce durante la carga del material y durante las operaciones de pesado, mezcla, cribado o limpieza del equipamiento.

3 Tareas de mantenimiento del equipamiento

El mantenimiento de los equipos es clave para asegurar su correcto y seguro funcionamiento.

Hay una cantidad muy diversa de tareas en las que los encargados de llevar a cabo la puesta a punto y revisiones periódicas de las instalaciones pueden producir una exposición accidental entre el trabajador y los nanomateriales en las distintas formas en que se pueden presentar.

En la fabricación de nanomateriales se suelen utilizar sistemas cerrados por lo que los encargados de la fabricación y supervisión del proceso no suelen estar expuestos. Pero es en el momento de revisar estos equipos o de reemplazar alguno de sus componentes cuando se puede producir el contacto con las personas y es cuando se debe extremar la precaución.

Estas tareas son muy variadas, y pueden consistir desde tareas de inspección, sustitución de piezas, sustitución de filtros, lijado, aplicación de pinturas o aislamientos, etc.

No obstante, cabe destacar que han sido desarrolladas aplicaciones de los nanomateriales que pueden facilitar estas tareas, como es el caso de pinturas inteligentes para la detección de grietas o corrosión que consiguen que no sea necesario exponer al trabajador a situaciones de riesgo como trabajos en altura o espacios confinados.

4. Gestión de residuos

Los nanomateriales son catalogados como residuos peligrosos por lo que las empresas deben contar con un Programa de Gestión de Residuos en el que se planifique todo el ciclo de vida del producto para impedir que éstos puedan mezclarse con otro tipo de productos.

Todo material en contacto con nanomateriales debe ser tratado de manera especial; los equipos de protección (como guantes, mascarillas y batas desechables) deben ser de un solo uso y el equipamiento reutilizable deberá pasar por procesos de descontaminación.

Las nanopartículas pueden terminar alcanzando el medio acuático a través del alcantariado, vertederos o incluso son capaces de resistir los tratamientos de aguas de las depuradoras, por lo que es especialmente aconsejable que los restos no lleguen en ningún caso a las aguas residuales. Es importante destacar que la mayor problemática respecto a la gestión de residuos se da en la materia particulada.

El proceso más aconsejable para tratar este tipo de residuos es la **incineración** ya que es la única forma de conseguir que no continúe la interacción de los nanomateriales con otro tipo de sustancias.

5. Generación involuntaria de nanomateriales

Como riesgo emergente, actualmente no se conocen las consecuencias de una exposición reiterada en el tiempo a los mismos y, quien sabe, si no se dará en un futuro en una situación similar a la del **amianto**; un producto que revolucionó completamente el sector de la construcción, naval y automovilístico entre otros por sus excelentes propiedades aislantes, mecánicas y de resistencia al calor, pero que tuvo que ser retirado del mercado debido a sus terribles consecuencias para la salud. Su uso y comercialización fueron prohibidos en España en el año 2002 y, aun así, según la OIT se producen 100.000 muertes al año a nivel mundial por enfermedades producidas por la exposición reiterada al amianto.

Por evitar que pueda repetirse un desastre de tal calibre, las recomendaciones ante la exposición a nanomateriales es calificarlos con el máximo nivel de peligro, pero, desgraciadamente, hay un gran número de trabajos en los que de forma accidental se generan nanopartículas y cuyos trabajadores no toman las medidas necesarias por el desconocimiento a lo que se encuentran expuestos.

A continuación, se muestra una lista no exhaustiva de trabajos en los que puede existir una exposición a nanomateriales:

5.1. Trabajos de soldadura

Los humos que se generan en los procesos de soldadura pueden contener nanopartículas de sustancias nocivas, especialmente en los procesos de soldadura de acero inoxidable que dan origen a sustancias cancerígenas, en estos casos, las precauciones deben ser máximas, se deben utilizar los EPI adecuados y uso de campanas extractoras. La exposición a nanomateriales puede producirse también en tareas de lijado o aplicación de pinturas.

5.2. Trabajos de construcción

El sector de la construcción es especialmente sensible a la exposición a nanomateriales. Hay una gran variedad de situaciones en la que el trabajador puede verse expuesto a ellos, tales como tareas de demolición; aplicación de revestimientos como mortero o materiales aislantes en las que se manejan sacas de materia particulada o líquida; tareas de lijado, limpieza, perforaciones o corte de materiales.

5.3. Tareas de pintura

En la actualidad gran parte de los barnices y pinturas han incorporado nanomateriales a su composición debido a sus innovadoras propiedades tales como una mejor adherencia, gamas de colores adicionales o, incluso, en la creación de las denominadas como «pinturas auto-limpiables».

5.4. Trabajos con polímeros

Numerosos aditivos pertenecientes a la nanotecnología son incorporados a productos compuestos por plástico debido a sus propiedades hidrófobas, resistentes a los rayos UV o ser capaces de aportarles conductividad térmica o eléctrica. En las tareas de manipulación de estos productos tales como lijado o taladrado, pueden ser emitidas nanopartículas por lo que requieren el uso de equipos de protección adecuados. Es importante añadir que existe riesgo de exposición a nanomateriales durante la utilización de impresoras 3D debido a los materiales que estas utilizan.

5.5. Trabajos agrarios

Diversos productos agroquímicos y fertilizantes contienen en su composición nanopartículas por lo que la manipulación de estos debe hacerse desde la máxima cautela.

5.6. Industria de la alimentación

En la industria alimentaria se han comenzado a utilizar nanomateriales como potenciadores del sabor y del color, ejemplos de estos son el E174 (plata) y el E551 (dióxido de silicio) por lo que se recomienda reducir al máximo la posible exposición laboral.

5.7. Existencia de motores de combustión

Además del uso de este tipo de motores en automóviles, a nivel industrial, equipos como generadores eléctricos hacen uso de estos sistemas para convertir la energía térmica en mecánica. Los humos que generan, especialmente los diésel y gasolina, pueden contener

nanopartículas por lo que es especialmente aconsejable poder encapsularlos para que ningún trabajador se vea expuesto a ellos. Un ejemplo de lugar de trabajo donde puede producirse la existencia accidental de nanopartículas son los aeropuertos, debido a su generación por parte de los aviones y a la que pueden verse expuestos los operarios principalmente de mantenimiento.



Figura 6.1. Muestra de combustión en avión FA18. Fuente: WIKIPEDIA (2007).

VII. Efectos para la salud de la exposición a nanomateriales

Una vez conocidos aquellos trabajos en los que existe una exposición de nanopartículas a las personas, es importante conocer cómo afectan éstas al organismo y cuáles son las variables que influyen en sus efectos dañinos.

Principalmente, los efectos toxicológicos de estos materiales se ven afectados por:

- Las vías de entrada al organismo, la duración y la frecuencia de la exposición.
- La toxicidad del propio material.
- Las características personales del trabajador, así como el tipo de actividad que se encuentre realizando.

1. Vías de entrada al organismo

Un aspecto clave para poder controlar la exposición laboral a nanomateriales es conocer las distintas vías de entradas por las que éstos pueden penetrar en el organismo.

La vía de entrada principal, al igual que ocurre con la gran mayoría de productos químicos en el entorno laboral, es la **inhalatoria**. Un aspecto importante a destacar es que el tamaño de las partículas influye enormemente en la zona del tracto respiratorio en que terminarán depositándose.

En la figura 7.1 se muestra una gráfica sobre cómo se produce la deposición de las nanopartículas por región y tamaño y, contrariamente a como se pensaba en estudios iniciales, un menor tamaño de la partícula no significa de forma directa una mayor penetración de éstas, debido a que en tamaños inferiores a 100 nm el mecanismo de deposición es la difusión.

Tomando distintos intervalos de tamaños se puede observar que:

- Las partículas de 10 a 20 nm de tamaño se depositan principalmente en la región alveolar; menos de un 20 % de ellas se alojan en las regiones nasofaríngea y traqueobronquial.
- Las partículas de 5 nm de tamaño se depositan por igual en las tres regiones.
- Las partículas de 1 nm o menos de tamaño se depositan principalmente en la región nasofaríngea, el 20 % de ellas se deposita en la región traqueobronquial y prácticamente ninguna es capaz de alcanzar la región alveolar.

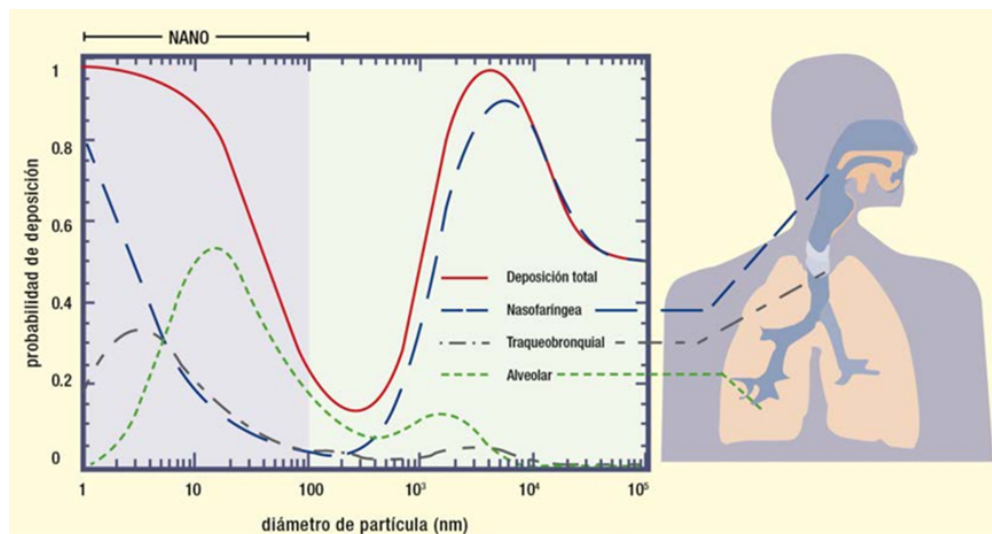


Figura 7.1. Deposición de partículas según su tamaño. Fuente: *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales - INNST* (2015, p19).

Las partículas que se alojan en la región nasofaríngea provocan efectos irritantes. La región especialmente peligrosa es la alveolar debido a que, como ocurre en el caso de otros agentes de mayor tamaño como en polvos de carbón mineral, provocan una respuesta pulmonar que puede producir inflamaciones y, en el peor de los casos, enfermedades tales como neumoconiosis o silicosis ante exposiciones crónicas.

La segunda vía de exposición más importante es la *vía dérmica*. La penetración suele producirse principalmente en piel dañada o lesionada, pero en tamaños inferiores a 40nm pueden atravesar incluso los tejidos que se encuentran en perfecto estado.

La penetración por esta vía depende principalmente de la zona afectada, el cuerpo posee distintos espesores de piel, y de la capacidad de penetración del propio agente debido principalmente a su tamaño y forma.

Por último, la tercera vía de entrada es la *digestiva*, dicha vía es mucho menos probable y, principalmente, está relacionada con deficiencias a nivel de higiene que pueden ser corregidas mediante buenas prácticas por parte de los trabajadores.

Sea cual sea la vía de entrada, la gran problemática de las nanopartículas es su capacidad de *translocarse*, es decir, debido a su diminuto tamaño son capaces de atravesar las membranas y barreras biológicas y llegar a órganos claves como el cerebro o el corazón.

2. Toxicidad propia de los nanomateriales

Tradicionalmente se ha relacionado la peligrosidad de los nanomateriales con la del mismo material de tamaños superiores, pero se ha demostrado que hay una serie de factores relacionados directamente con la peligrosidad, independientemente del material del que se trate. Estos factores que han sido enumerados por el INSST⁷ son:

- **Su propia composición química:** como mínimo se debe suponer que tienen una toxicidad similar al del mismo material en escala no nanométrica.
- **Solubilidad en los fluidos biológicos:** las partículas insolubles son las categorizadas como de mayor peligrosidad debido a que mantienen sus características toxicológicas intactas. De no conocer su solubilidad deben ser catalogados como insolubles.
- **Tamaño y área superficial específica:** al disminuir el tamaño aumenta considerablemente el área superficial por unidad de masa, lo que tiene como consecuencia un aumento en la reactividad.
- **Forma:** al igual que ocurre en materiales de mayor tamaño, aquellos con forma tubular o de fibra presentan una mayor peligrosidad que su versión esférica, debido a que tienden a fragmentarse y a terminar clavados en tejidos.

7 INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2015). *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales*. Disponible en: <https://www.insst.es/seguridad-y-salud-en-el-trabajo-con-nanomateriales>

- **Estructura cristalina:** las distintas estructuras poseen un comportamiento distinto al interactuar con el organismo.
- **Estado de aglomeración:** el lugar donde se depositan en el tracto respiratorio puede variar al crearse estructuras de mayor tamaño.

Hay que añadir que todos los factores nombrados pueden interactuar de manera distinta según el sujeto al que afecten, de su susceptibilidad personal y, del tipo de actividad que se encuentre realizando, la intensidad de esta y el tiempo al que se expone al nanomaterial. A modo de resumen, los posibles efectos a la exposición de nanomateriales se encuentran enumerados en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Efectos de la exposición a nanopartículas. Fuente: *Gestión riesgos laborales en trabajadores expuestos a nanomateriales - FREMAP (2015, p39)*.

EFFECTOS CRÓNICOS	EFFECTOS AGUDOS
Incremento de síntomas respiratorios	Reacciones inflamatorias del pulmón
Reducción de la función pulmonar en adultos	Síntomas respiratorios
Aumento en enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)	Efectos adversos en el sistema cardiovascular
Reducción de la esperanza de vida	Aumento del uso de medicamentos
	Aumento de ingresos hospitalarios
	Aumento de la mortalidad

3. Dopaje como estrategia para reducir la peligrosidad

Por último, respecto a la toxicidad de los nanomateriales, la tecnología alrededor de éstos se encuentra en continua evolución y se están realizando numerosos experimentos relacionados con el **doping** de nanomateriales, es decir, el aporte de sustancias adicionales que no influyen en las propiedades deseadas, pero consiguen reducir la respuesta adversa que se produce en el organismo ante la interacción con éstos.

Esta estrategia se está adoptando principalmente ante nanomateriales metálicos debido a que son el grupo más numeroso y de mayor aplicación en el mercado. Y de, entre estos, los que han recibido mayor atención son el ZnO (Óxido de Zinc) y el CuO (Óxido de cobre), en los que se ha demostrado que dopándolos con partículas de hierro se consigue una disminución en la absorción de los tejidos, lo que conlleva una **reducción de su toxicidad**⁸.

8 RAMANATHAN, A. (2019). «Toxicity of nanoparticles_ challenges and opportunities». *National Library of Medicine (NIH)*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7818359/>

4. Riesgos para la seguridad de los nanomateriales

Tal y como ocurre con la toxicidad, en comparación con tamaños mayores de sustancias y debido a su pequeño tamaño y al incremento de su área superficial, es esperable que, como mínimo, los riesgos desde el punto de vista para la seguridad sean los mismos o incluso aún mayores por lo que siempre se debe actuar teniendo en cuenta esta observación.

Al tratarse de materia particulada, los riesgos más importantes son los de **incendio y explosión**, aunque no pueden extrapolarse directamente a la normativa de atmósferas explosivas (ATEX) debido al reducido número de estudios realizados, por lo que se requiere una mayor investigación.

La mayor preocupación con respecto a sus equivalentes de mayor tamaño se debe a que, debido a la reducción en su escala, las nanopartículas son capaces de estar suspendidas en el aire durante periodos de tiempo mucho más largos, por ejemplo, una partícula esférica de 100 nm de diámetro y 1 g/cm³ de densidad permanece en el aire 304 horas antes de precipitar por acción de la gravedad desde una altura de un metro. En cambio, ante un tamaño de 1 µm precipitará en 7,5 horas mientras que si fuese de 10 µm precipitaría en 6,1 minutos⁹.

Ciertos materiales como el aluminio en su tamaño nanométrico han demostrado¹⁰ comportarse de una manera más violenta y requieren de una energía mínima de ignición (EMI) menor para comenzar una reacción, por lo que puede producirse una explosión más fácilmente que en el caso de nubes de tamaños de partículas superiores.

Aun así, es importante añadir que generalmente cuando se trabaja con nanomateriales las cantidades suelen ser pequeñas, del orden de gramos, por lo que el riesgo de explosión se reduce considerablemente.

Otros riesgos como **electrocución o asfixia** se pueden ver potenciados por la existencia de partículas nanométricas por lo que ante su existencia las precauciones a tomar deben de ser mayores.

5. Cómo detectar y medir los nanomateriales

El artículo 15 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales dice que se deben de evitar los riesgos siempre y cuando sea posible, pero en el caso de que no sea viablemente posible evitarlos, estos riesgos deben de ser **evaluados**.

9 GESELLSCHAFT FÜR AEROSOLFORSCHUNG (GAEF). (2020). *Position paper from the Society for Aerosol Research - for understanding the SARS-Cov-2 infection process*. Disponible en: <https://www.info.gaef.de/position-paper>

10 GRIFFIN, S., IRFAN, M., JAWAD, M., SARFRAD, M. (2018). «Natural Nanoparticles: A Particular Matter Inspired by Nature». *National Library of Medicine (NIH)*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5789313/>

En el caso de los nanomateriales, la evaluación resulta mucho más complicada en comparación con las sustancias de mayor tamaño debido a la ausencia de *Valores límites de exposición para agentes químicos de tamaño nanométrico armonizados*. Otra dificultad está asociada a la falta de consenso en la unidad de medida adecuada para los nanomateriales, por sus distintas formas de presentación, pero las principales que se presentan son masa/volumen, n.º partículas/volumen o área superficial/ volumen.

Si bien es cierto que distintas organizaciones han propuesto valores para algunas nanopartículas tras la realización de experimentos principalmente en roedores. El gran problema radica en las distintas formas de presentación en que puede producirse la exposición. Aquellos valores límite creados en laboratorios en condiciones ideales se alejan considerablemente de lo que ocurre en el entorno laboral, por lo que, aunque nos sirven de referencia y son un primer paso para ser capaces de conocer las condiciones del entorno de trabajo, medidas adicionales son necesarias para no subestimar la potencial exposición de los trabajadores.

NIOSH es referencia a nivel mundial en todo lo relacionado con nanomateriales y reconoce la dificultad para establecer valores de referencia que sirvan para la gran variedad de nanopartículas, aun así, para los más utilizados se indican algunos valores recomendados:

- **Nanotubos y nanofibras de carbono:** 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbono elemental respirable como promedio ponderado para una jornada de trabajo de 8 horas.
- **Dióxido de titanio:** 0,3 mg/m^3 para dióxido de titanio ultrafino (incluida la nanoescala).
- **Plata:** 0,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (se espera que sea reducido aún más) de partículas respirables como promedio ponderado para una jornada de trabajo de 8 horas.

En Europa destacan tres organizaciones que han propuesto sus propios valores y de las que el INSST ha realizado una recolección de los mismos:

British Standard Institution (BSI):

El BSI publicó unos valores de referencia para cuatro de los grupos más representativos basados en que los nanomateriales son más tóxicos que sus equivalentes a una escala mayor, por lo que estos valores consisten en la aplicación de un factor de seguridad (WEL) para conseguir un nivel de exposición aconsejado, que no debe ser tomado como seguro debido a una suficiente cantidad de estudios sobre los mismos.

Es importante destacar que el objetivo de estos valores es poner a prueba la eficacia de las medidas de control implantadas y no están basados en los efectos que pueden provocar en el organismo. La tabla 7.2. muestra los valores de referencia en base al tipo de material.

Tabla 7.2. Niveles de exposición de referencia (BEL). Fuente:
Dimensión nano desde la toxicología. - INSST (2015, p39).

NANOMATERIAL	BENCHMARK EXPOSURE LEVELS
Insoluble	0,066 x WEL ¹ 20.000 partículas/cm ³
Soluble	0,5 x WEL
CMAR ²	0,1 x WEL
Fibroso	0,01 fibras/cm ³

¹WEL: Exposición en lugar de trabajo

²CMAR: cancerígeno, mutágeno, asmágeno, tóxico para la reproducción

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA):

Al igual que los valores de referencia del BSI, estos valores sirven para comprobar la efectividad de las medidas de control implementadas.

La principal diferencia con respecto al anterior es que tienen en cuenta el tamaño y densidad de las partículas.

En ningún caso estos valores deben ser utilizados cuando se realiza la evaluación a humos de soldadura o emisiones de motores de combustión. La tabla 7.3 indica los valores de referencia en función del tipo de material.

Tabla 7.3. Niveles de referencia recomendados (RBL). Fuente:
Dimensión nano desde la toxicología - INSST (2015, p40).

NANOMATERIAL	RECOMMENDED BENCHMARK LEVELS
Metales, óxidos metálicos y otros materiales en polvo biopersistentes de densidad > 6.000 kg/m ³	20.000 partículas/cm ³
Materiales en polvo biopersistentes de densidad < 6.000 kg/m ³	40.000 partículas/cm ³
Nanotubos de carbono	0,01 fibras/cm ³
Partículas líquidas ultrafinas	MAK ^a o AGW ^b

^aMAK- Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (Concentración máxima en lugares de trabajo).

^bAGW- Arbeitsplatzgrenzwerte (Límite de exposición profesional).

Social and Economic Council of the Netherlands (SER):

Estos valores han sido desarrollados a partir de los de la IFA y son una recomendación para las empresas de Países Bajos.

Los valores han sido diseñados para exposiciones de 8 horas y, en caso de exposiciones de corta duración (15 minutos), estos valores deben de ser multiplicados por dos. La tabla 7.4 indica los valores de referencia establecidos por el SER.

Tabla 7.4. Nanovalores de referencia (NRVs). Fuente: *Dimensión nano desde la toxicología - INSST (2015, p41)*

NANOMATERIALES	NANO REFERENCE VALUE (NRV)	EJEMPLOS
Granulares biopersistentes de densidad > 6.000 kg/m ³	20.000 partículas/cm ³	Ag, Au, CeO ₂
Granulares y fibrosos biopersistentes de densidad < 6.000 kg/m ³	40.000 partículas/cm ³	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ , ZnO, negro de humo, nanoarcilla, C ₆₀
Nanofibras rígidas y biopersistentes para las cuales no se descartan efectos similares a los del amianto	0,01 fibras/cm ³	SWCNT, MWCNT, fibras de óxidos metálicos
Granulares no biopersistentes	Límite de exposición profesional en escala no nanométrica	Lípidos, NaCl

VIII. Evaluación de la exposición

Del análisis de estos valores se puede deducir que es necesaria una investigación mucho más profunda en el campo de los nanomateriales. Aun así, parece que la estrategia más acertada, de momento, es la agrupación de éstos en familias de modo que se puedan dar unos valores a modo de recomendación.

1. Métodos cuantitativos

Según el Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, para la realización de la evaluación de la exposición por inhalación se requiere la medición de la concentración del agente químico y su posterior comparación con su valor límite ambiental (VLA).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, sólo una pequeña cantidad de nanomateriales poseen unos valores representativos de referencia que no tienen una correlación directa con la concentración máxima asumible, sino que nos sirven para evaluar la eficacia de las medidas adoptadas.

Aun así, en el caso de que nos enfrentemos ante la exposición de un nanomaterial de uso común y que posea un valor de referencia establecido por un organismo de prestigio como

los anteriormente citados, el método más adecuado que se debe seguir es el **cuantitativo**, es decir, conocer la proporción en que este agente se encuentra en el ambiente y compararla con los de su correspondiente valor.

Dentro de los equipos de medición se distinguen dos grupos principales, los cuales deben ser seleccionados según los criterios a considerar por el técnico que realice la evaluación. Los equipos de medición se clasifican en:

1.1. Equipos de medición directa

Estos equipos son capaces de determinar **de forma inmediata** un valor de concentración por lo que son especialmente adecuados para detectar el aumento o disminución en la concentración de las nanopartículas.

La gran ventaja de estos equipos es que generalmente son portátiles, tienen un peso reducido y su coste no es demasiado elevado.

Como inconveniente se debe indicar que no son capaces de diferenciar el tipo de partícula, tan sólo la concentración de la misma por lo que debemos conocer de antemano ante qué agente nos encontramos expuestos. Por otro lado, sólo son capaces de medir la exposición ambiental, no la personal del trabajador, por lo que su principal uso es para conocer de forma global la concentración del agente en el espacio. La figura 8.1 muestra equipos portátiles para la medición de nanopartículas.



Figura 8.1. Ejemplos de equipos portátiles para medición de nanopartículas.
Fuente: *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales* - INNST (2015, p36).

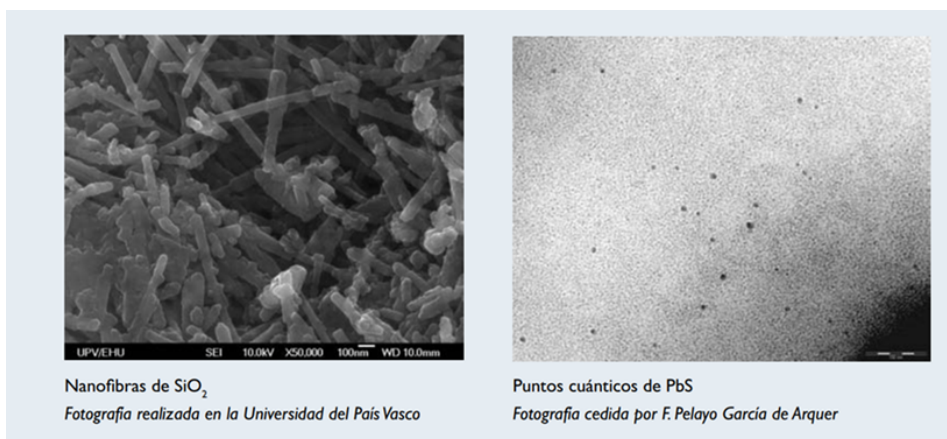
1.2. Toma de muestras indirecta

Estos equipos requieren de una fase de toma de muestra y una posterior en laboratorio de análisis por lo que no es un proceso inmediato.

A diferencia de los equipos de medida directos, es posible conocer qué nanomaterial se encuentra en el ambiente, por lo que son ideales cuando se tengan dudas respecto al agente de la exposición.

Además de identificar al agente también son capaces de medir la concentración del mismo, aunque el principal problema de la exposición a nanomateriales es que normalmente su tiempo de exposición es muy reducido por lo que tomar adecuadamente la muestra puede resultar muy complicado y se requieren caudales de muestreo bastante elevados. La figura 8.2. muestra la identificación mediante microscopía electrónica.

Figura 8.2. Identificación de nanopartícula mediante microscopía electrónica.
Fuente: *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales - INNST* (2015, p38).



2. Métodos cualitativos

De forma general, los métodos cualitativos no pueden sustituir a los cuantitativos para realizar una evaluación de la exposición, simplemente son un complemento.

En el caso de los nanomateriales esta situación es distinta, debido a la inexistencia de valores de referencia para multitud de nanopartículas, por lo que ante la imposibilidad de comparar la muestra con su valor límite, los métodos cualitativos se convierten en la solución más viable técnicamente.

La gran ventaja que aportan los métodos cualitativos es que, a diferencia de los valores de referencia existentes para la evaluación de nanomateriales, que únicamente pueden ser utilizados ante nanomateriales creados a nivel industrial de forma intencionada, este tipo de métodos permiten conocer de forma orientativa la exposición a nanopartículas en el centro de trabajo incluyendo aquellas que han sido creadas de forma accidental como es el caso de humos de soldadura y procesos de combustión.

En la actualidad los métodos cualitativos más utilizados son tres:

- El método CB NANOTOOL 2.0 (Tabla 8.1).

- El método STOFFENMANAGER NANO 1.0 (Tabla 8.2).
- El método ISO/TS 12901-2:2014 que utiliza bandas de control (Tabla 8.3).

Tabla 8.1. Características del Método CB NANOTOOL 2.0. Fuente: Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales - INNST (2015, p31).

Fundamento	<p>1) Cálculo de la puntuación de severidad a partir de 15 factores basados en las propiedades fisicoquímicas del nanomaterial (química superficial, forma y diámetro de la partícula y solubilidad); propiedades toxicológicas del nanomaterial y del material en forma no nano (carcinogenicidad, toxicidad para la reproducción, mutagenicidad, toxicidad dérmica y capacidad de producir asma). Para el material en forma no nano se considera también la toxicidad basada en el valor límite.</p> <p>2) Cálculo de la puntuación de probabilidad a partir de los siguientes factores: cantidad estimada de nanomaterial utilizada durante la tarea, capacidad de emisión de polvo o pulverulencia, capacidad para formar nieblas del nanomaterial, número de trabajadores con exposición similar, frecuencia y duración de la operación.</p>
Resultado	<p>Cuatro bandas de control basadas en una matriz de nivel de riesgo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nivel de Riesgo 1: Ventilación general - Nivel de Riesgo 2: Extracción localizada - Nivel de Riesgo 3: Confinamiento - Nivel de Riesgo 4: Solicitar asesoramiento externo
Aplicabilidad	Pequeñas cantidades de nanomaterial, en trabajos de laboratorio o producción a pequeña escala.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - La información toxicológica disponible para determinar la puntuación de la severidad es, en muchos casos, muy limitada. - Puede resultar difícil asignar la categoría a la capacidad de emisión de polvo. - En ausencia de datos, se aplica el 75% de la puntuación máxima para ese factor. - La importancia relativa de un factor comparado con otro puede cambiar a medida que se disponga de más información toxicológica del nanomaterial. - En general, no permite incorporar información sobre posibles cambios en el proceso, tales como automatización, eliminación de rutas de transporte, etc.
Desarrollado por	David M. Zalk, Samuel Y. Paik et al. US Lawrence Livermore National Laboratory. http://controlbanding.net .

Tabla 8.2. Características del Método STOFFENMANAGER NANO 1.0. Fuente: *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales - INNST (2015, p32).*

Fundamento	<p>1) Cálculo de la banda de peligro a partir de factores como la solubilidad, la presencia de fibras en el nanomaterial y las propiedades toxicológicas del nano-objeto manufacturado (MNO), teniendo en cuenta las propiedades del material en forma no nano.</p> <p>2) Cálculo de la banda de exposición a partir de los siguientes factores: porcentaje de MNO en el producto, capacidad de emisión de polvo o pulverulencia, grado de humedad del producto, dilución en agua, viscosidad, operaciones de síntesis y manipulación de sólidos o líquidos, medidas de control, contaminación de superficies, separación del trabajador, equipo de protección respiratoria, duración y frecuencia de la tarea.</p>
Resultado	<p>Tres bandas de riesgo o prioridad de riesgo siendo la banda I la de mayor prioridad y la 3 la de menor prioridad.</p> <p>Permite introducir diferentes medidas de control y ver cómo afecta su implementación al nivel de riesgo.</p>
Aplicabilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Nanomateriales insolubles (en agua) < 0,1 g/l. - Tamaño de partícula primaria menor de 100 nm y/o superficie específica mayor de 60 m²/g. - Partículas primarias y agregados/aglomerados. - Se aplica tanto en laboratorios de investigación como a nivel industrial. - Únicamente para la evaluación cualitativa del riesgo por inhalación.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - A los MNO incluidos en la categoría de mayor peligro (fibras persistentes) se les asigna la banda de riesgo de mayor prioridad independientemente de la exposición, debido a que se aplica el principio de precaución. - Cuando no se dispone de información toxicológica, los MNO se asocian a la banda de mayor prioridad si la exposición es elevada. - No indica las medidas de control a aplicar para el nivel de riesgo obtenido, sino la prioridad de acción. - La herramienta no se aplica a operaciones (como la abrasión de productos) en las que el MNO esté embebido en la matriz debido a que se considera que durante dichas operaciones no se liberan MNO.
Desarrollado por	<p>Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO), Dutch Ministry Scientific Research and Arbo Unie.</p> <p>http://nano.stoffenmanager.nl.</p>

Tabla 8.3. Características del método descrito en ISO/TS 12901-2:2014. Fuente: *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales - INNST (2015, p33)*.

Fundamento	<p>1) Cálculo de la banda de peligro a partir de factores como la solubilidad o la presencia de fibras en el nanomaterial, teniendo en cuenta las propiedades del material en forma no nano.</p> <p>2) Cálculo de la banda de exposición a partir de los siguientes factores: estado físico del nanomaterial, operaciones de síntesis, fabricación y producción, cantidad de nanomaterial, viscosidad, volatilidad y capacidad de emisión de polvo.</p>
Resultado	<p>Cinco bandas de control, indicando medidas de control a aplicar en cada caso:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CB 1: Ventilación general - CB 2: Extracción localizada - CB 3: Sistema cerrado con extracción (cabinas ventiladas, reactor cerrado con apertura regular) - CB 4: Contención completa (caja de guantes, sistemas cerrados en continuo) - CB 5: Contención completa y supervisión por experto <p>En este método, al calcular la banda de exposición, se pueden tener en cuenta las medidas de control y el resultado serían tres bandas de riesgo.</p>
Aplicabilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Partículas cuya solubilidad en agua sea $< 0,1 \text{ g/l}$. - Partícula individual y agregados o aglomerados. - Sólo para la evaluación cualitativa del riesgo por inhalación.
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - En caso de que el nanomaterial contenga fibras, se asigna a la banda de mayor peligrosidad (E), salvo que exista información toxicológica que justifique su asignación en otra banda. - Cuando no se dispone de información toxicológica del material en la forma no nano, los nanomateriales se asocian a la banda de mayor peligrosidad.
Desarrollado por	<p>ISO. Technical Committee ISO/TC 229, Nanotechnologies http://iso.org</p>

IX. Cómo actuar en presencia de nanomateriales

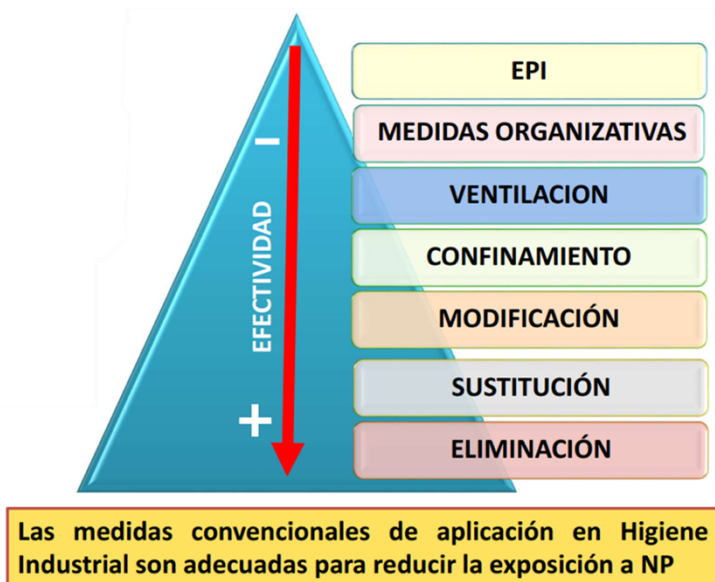
La Ley de Prevención de Riesgos Laborales (LPRL) establece que es obligación del empresario velar por la salud y seguridad de sus trabajadores.

Afortunadamente, los principios generales de la acción preventiva son aplicables a los nanomateriales. Estos se resumen en:

- Actuar sobre el problema **en origen**, es decir, sobre la fuente de generación del agente.
- Tomar medidas de forma que la exposición sea **controlada** y no se extienda por el entorno laboral.
- Por último, cuando las dos anteriores no hayan podido eliminar el riesgo por completo, se deberán de tomar **acciones sobre el trabajador**, como puede ser el uso de equipos de protección individual (EPI).

La figura 9.1 muestra los principios generales de la acción preventiva.

Figura 9.1. Principios generales de la acción preventiva. Fuente: *Gestión de riesgos laborales en trabajadores expuestos a nanomateriales - FREMAP* (2018, p113).



1. Medidas preventivas ante la exposición

En orden de importancia se describen a continuación las medidas que deben ser tomadas por el empresario para la adopción de unos adecuados procedimientos de trabajo cuando se trabaje con nanopartículas.

1.1. Eliminación o sustitución del nanomaterial

La utilización de un producto en tamaño nanométrico implica asumir unos riesgos que no deberían existir en el caso de utilizar un material de tamaño superior.

Debe estudiarse de forma minuciosa si realmente es necesario utilizar el nanomaterial, valorar las ventajas e inconvenientes que aporta, y analizar si puede ser sustituido por un nanomaterial de menor peligrosidad o por otro agente que no pertenezca a la nanoescala.

La eliminación o sustitución debe ser la medida prioritaria frente a la exposición a agentes clasificados como cancerígenos o mutágenos.

Se pueden utilizar herramientas tales como Stoffenmanager o GISBAU para buscar alternativas de sustitución del agente.

1.2. Modificación del proceso

La selección de la herramienta de trabajo, en el caso de que la haya, es especialmente relevante; ante arranque de materiales se deben priorizar aquellas menos potentes o que posean sistemas de extracción integrados para evitar la emisión de nanopartículas al entorno laboral.

Es importante mencionar que el máximo nivel de peligrosidad se da en aquellas nanopartículas en forma de polvo por lo que, de ser técnicamente posible, deben ser utilizadas en forma líquida o de pasta de forma que se reduzca al máximo la generación de nubes de polvo. Ante la imposibilidad de cambiar su modo de presentación, es conveniente humedecer el material durante el proceso.

Este punto es especialmente relevante desde el punto de vista de la **Seguridad**, ya que es necesario reducir al máximo la existencia de atmósferas que sean susceptibles de ser fuentes de ignición que puedan terminar produciendo incendios o explosiones.

1.3. Confinamiento del proceso

La forma idónea de trabajar con nanomateriales es mediante el aislamiento del proceso de trabajo, es decir, la creación de una barrera física entre la fuente de emisión del contaminante y el trabajador.

Hay numerosos tipos de equipos en el mercado, desde aquellos completamente herméticos como las **cabinas de seguridad biológica** (Figura 9.2), en las que el trabajador trabaja utilizando unos guantes integrados en la misma y que poseen una extracción de los humos y vapores que puedan generarse en el proceso, siendo de vital importancia la utilización de **filtros HEPA de clase 14 o ULPA**.

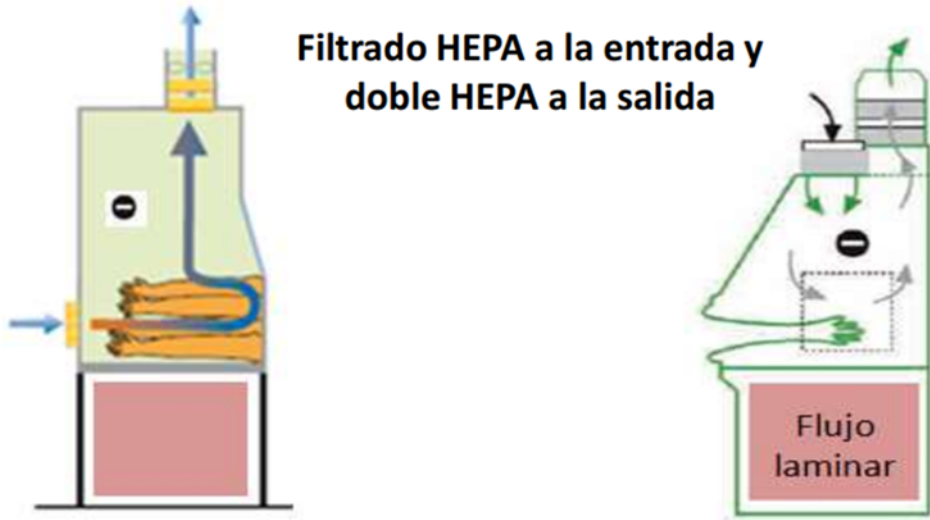


Figura 9.2. Funcionamiento cabina seguridad biológica. Fuente: *Gestión riesgos laborales en trabajadores expuestos a nanomateriales - FREMAP (2018, p120)*.

Aunque su utilización no es tan habitual, existen sistemas que funcionan por **control remoto** (Figura 9.3) en los que el trabajador únicamente realiza labores de supervisión.



Figura 9.3. Sistema de control remoto. Fuente: *Gestión riesgos laborales en trabajadores expuestos a nanomateriales - FREMAP (2018, p125)*.

La adaptación en el diseño de los equipos (Figura 9.4) es fundamental ya que puede reducir en gran medida la exposición laboral durante las tareas de envasado de productos.

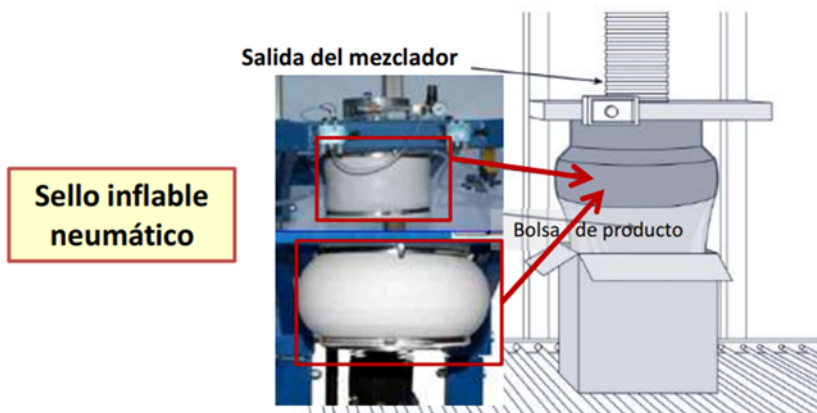


Figura 9.4. Adaptación para envasado de nanopartículas. Fuente: *Gestión de riesgos laborales en trabajadores expuestos a nanomateriales - FREMAP (2018, p122)*.

1.4. Ventilación durante el proceso productivo

Al emitirse materia particulada o humos o vapores es necesaria la utilización de sistemas que capten estas emisiones de forma que no acaben alcanzando la zona de respiración del trabajador. Al tratarse de un material peligroso este tipo de medidas se vuelven aún más importantes.

Existen distintos sistemas de ventilación por extracción localizada, aunque las campanas de extracción son las más habituales. Es imprescindible que estén situadas lo más cerca del foco de emisión y su eficacia debe ser comprobada de modo que, tanto el caudal de la misma como la superficie de aspiración, sean las idóneas y meticulosamente seleccionados durante la fase de diseño.

Es importante tener en cuenta que, a diferencia de los sistemas de ventilación general (los cuales no están recomendados para materia particulada), la ventilación localizada está situada en un lugar específico del espacio de trabajo, por lo que se limitan los espacios en los que pueden realizar su actividad los trabajadores. Su selección y diseño resulta mucho más complejo en talleres y grandes espacios de trabajo que en laboratorios de investigación.

Al igual que en el uso de los sistemas herméticos es necesaria la utilización de **filtros HEPA de clase 14 o ULPA**, siendo especialmente relevante en el caso de trabajos de soldadura, debido a que sin la utilización de éstos las nanopartículas generadas serían expulsadas al exterior a través de las salidas del sistema de ventilación. La figura 9.5. muestra un sistema de extracción localizada para humos de soldadura.



Figura 9.5. Campana de extracción de humos de soldadura. Fuente: *NEDERMAN* (2024).

1.5. Medidas organizativas

Este tipo de medidas deben ser tomadas en combinación con todas las anteriormente nombradas, debido a que de nada sirven si el trabajador está expuesto directamente a concentraciones considerables de nanopartículas.

Entre las medidas más importantes destacan las siguientes:

- Las áreas con presencia de nanomateriales deben estar adecuadamente **señalizadas**, si bien es cierto que no existe una señal armonizada para nanomateriales, se está empezando a utilizar la de la figura 9.6, y sólo se debe permitir el acceso a aquellas personas para las que sea absolutamente indispensable, con el objetivo de que el **menor número posible** de trabajadores se vea expuesto a las nanopartículas. Es también de vital importancia que los trabajadores estén en estas áreas de especial peligrosidad el **mínimo tiempo necesario**.

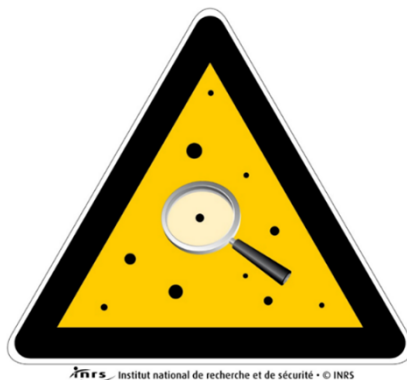


Figura 7.6. Pictograma de señalización para nanomateriales. Fuente:

Instituto Nacional de Investigación y Seguridad - INRS (2013).

- Uno de los principales motivos para la aparición de fugas en los equipos de trabajo es la falta de **mantenimiento** o la realización de este sin seguir las instrucciones del fabricante. Por lo que es de vital importancia respetar la metodología y los plazos indicados en los manuales de instrucciones.
- Ante el contacto con materia categorizada como de especial peligrosidad la **limpieza** es un aspecto clave, las superficies de trabajo deben de ser limpiadas regularmente y aquellos equipos en contacto con nanopartículas deben ser desinfectados. No se recomienda utilizar equipos de aire a presión o escobas para no levantar nubes de polvo.
- Es necesario recordar también la adecuada **higiene personal** que han de llevar los trabajadores, siguiendo las instrucciones de trabajo descritas respecto al vestuario y evitar comer en las zonas con posible existencia de nanopartículas para evitar su posible entrada por vía digestiva.
- Para la realización de cualquier trabajo una formación adecuada es clave, pero al enfrentarse a una situación como es la nanotecnología, de la cual aún se desconoce realmente su grado de peligrosidad, la importancia de la **formación** destaca aún más.

Aquellas personas que pueden tener un contacto con las nanopartículas deben conocer los riesgos a los que se enfrentan, las distintas vías de entrada al organismo y cómo detectar posibles alteraciones de salud provocadas por una exposición a nanomateriales.

Los trabajadores deben poseer unas instrucciones de trabajo claras y precisas tanto sobre el adecuado uso, mantenimiento e inspecciones de los distintos equipos de trabajo, como de la correcta utilización y conservación de las medidas de protección necesarias. Resulta imprescindible también que los trabajadores sepan cómo actuar en caso de emergencia.

1.6. Equipos de protección individual (EPI)

Los equipos de protección individual (EPI), tal y como establece la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales, deberán ser utilizados, cuando aun habiendo tomado todas las medidas preventivas descritas en la planificación de la acción preventiva, siga existiendo riesgo de exposición a un determinado agente. Estos equipos deben ser seleccionados de acuerdo a los resultados obtenidos en la Evaluación de Riesgos.

Todo EPI debe cumplir las exigencias mínimas de seguridad y salud recogidas en el Real Decreto 773/1997 así como poseer el marcado CE que certifica su cumplimiento.

Aun así, este Real Decreto no cita de forma expresa a los nanomateriales, por lo que estudios que comprueben la eficacia de los EPIS ante las nanopartículas son necesarios y, actualmente, no existe ninguna norma que regule la protección que realmente ofrecen estos equipos ante los nanomateriales.

La utilización de los EPI es especialmente necesaria cuando nos encontremos ante un nanomaterial del que se conoce que tiene un alto nivel de peligrosidad o este sea descono-

cido. Un EPI debe ser utilizado en situaciones de emergencia o de forma puntual, en ningún caso se puede utilizar un EPI por encima de medidas de protección colectivas, por lo que su uso de manera permanente debe de estar justificado.

Los principales EPI utilizados ante exposiciones laborales a nanopartículas son:

1.6.1. Equipos de protección respiratoria

Debido a que la principal vía de entrada de las nanopartículas es la respiratoria, el uso de equipos de protección respiratoria es sin duda el EPI más importante a utilizar cuando existe una concentración ambiental de nanomateriales.

Estos equipos deben tener la máxima protección contra partículas (P3) y, de existir otros agentes químicos adicionales, se deben utilizar filtros mixtos que además sirvan contra gases y vapores. Otra alternativa es la utilización de **mascarillas autofiltrantes** del tipo FFP3.

Ante la exposición a nanopartículas cobra una vital importancia el adecuado ajuste de la protección facial, debido a que hay estudios¹¹ que demuestran que la penetración debido a una incorrecta colocación del equipo provoca fugas entre 7 y 20 veces superiores a las que consiguen penetrar el filtro, por lo que se recomienda reducir al máximo la presencia de vello facial.

1.6.2. Guantes de protección

La vía dérmica es la segunda vía de entrada más importante para las nanopartículas, así que el uso de guantes se convierte en prácticamente una obligación según el tipo de trabajo que se vaya a realizar.

Las características más importantes de los guantes de protección son su **impermeabilidad** y su **resistencia a la penetración**, donde destacan especialmente los de nitrilo y los de látex, aunque se debe tener en cuenta la existencia de otro tipo de agentes que puedan existir a la vez que las nanopartículas como por ejemplo disolventes, los cuales pueden reducir drásticamente la vida útil del guante.

En el caso de utilizar guantes desechables se recomienda utilizar dos pares; lo cual es especialmente útil como sistema de protección adicional, se retira el primer guante al terminar los trabajos y el segundo tras haberse retirado la ropa de protección.

11 INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2023). *Estudio sobre la eficacia de guantes y ropa de protección frente a nanopartículas*. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/material-tecnico/documentos-tecnicos/estudio-eficacia-guantes-y-ropa-de-proteccion-frente-a-nanoparticulas-2023>

1.6.3. Ropa de protección

En la selección del material de la ropa de protección, los materiales «**no tejidos**» como el polietileno de alta densidad, han demostrado tener una protección mucho mayor que los «tejidos», como las batas de algodón.

De ser posible debe ser utilizada **ropa desechable**, pero, ante la utilización de batas de algodón, estas deberán dejarse siempre en la zona de trabajo para evitar la dispersión y ser desinfectadas con la mayor frecuencia posible.

El INSST en su «Guía de seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales» incluye entre sus recomendaciones para la selección de ropa de protección: *«La utilización de trajes desechables contra riesgos químicos de Tipo 5, con capucha, cubre-zapatos, sujeción en el cuello y puños y sin solapas o bolsillos. Si el nanomaterial se encuentra en disolución coloidal y pudiera existir contacto con los medios líquidos por salpicaduras, debe valorarse el uso de ropa de protección química de Tipo 6 o 4. En el mercado existen modelos de trajes desechables que están certificados como Tipo 5 y 6 a la vez o incluso como Tipo 4, 5 y 6»*¹².

1.6.4. Protección ocular

Debido a que las nanopartículas son capaces de penetrar al organismo a través de los ojos, estos deben ser protegido mediante protección ocular.

El tipo de protección ocular depende del estado en que se encuentre el nanomaterial; ante materia particulada se recomienda el uso de **gafas de montura universal**, mientras que ante la manipulación de líquidos que contengan nanomateriales se aconseja el uso de **pantallas faciales**.

Para una adecuada selección de la protección ocular resulta imprescindible tener en cuenta qué otro tipo de EPI se va a utilizar de forma simultánea, por lo que se puede valorar el uso de máscaras completas que incluyen protección ocular y respiratoria. La figura 9.7. muestra la utilización de EPI durante el trabajo con nanomateriales.

12 INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2015). *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales*. Disponible en: <https://www.insst.es/seguridad-y-salud-en-el-trabajo-con-nanomateriales>



Figura 9.7. EPI ante exposición a nanomateriales. Fuente: WATERFIRE (2017)

X. Vigilancia de la salud

La Ley de Prevención de Riesgos Laborales indica que es obligación del empresario la realización de la vigilancia de la salud a sus trabajadores tanto de forma inicial en la contratación como la realización de reconocimientos médicos periódicos.

La vigilancia de la salud es un derecho de los trabajadores, pero es de carácter voluntario excepto ante actividades consideradas como de especial peligrosidad. Es cierto que debido a la falta de investigación en el campo de la nanotecnología esta se encuentra exenta de la aplicación de parte de la normativa, pero aplicando el principio de precaución y al enfrentarse a una tecnología cuyos efectos sobre la salud aún se desconocen se recomienda encarecidamente a todo trabajador que pueda estar expuesto a las nanopartículas la realización de los reconocimientos médicos necesarios.

La guía «*Guidance on Medical Screening and Hazard Surveillance for Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles*»¹³, realiza una recolección de las prácticas recomendadas para la realización de los protocolos de vigilancia de la salud a trabajadores expuestos a nanopartículas, especialmente indicado ante la existencia de nanotubos y nanofibras de carbono que son los que entrañan un mayor peligro. Las cuales se resumen en lo siguiente:

1. **Examen médico inicial** al incorporarse al puesto de trabajo o ante la ausencia por un periodo de tiempo prolongado, así como la recopilación de los trabajos anteriormente

13 NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). (2009). *Guidance for Medical Screening and Hazard Surveillance for Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles*. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-116/>

realizados por el trabajador y que hayan podido tener efecto sobre su salud. Esta prueba inicial debe constar como mínimo de las siguientes partes:

- Historial médico.
 - Estado respiratorio.
 - Alergias.
 - Radiografía de tórax o espirometría.
2. **Examen médico periódico** según los plazos necesarios para cada tipo de actividad, el cual debe constar de pruebas específicas relativas al nanomaterial en cuestión. Las partes de las que debe constar son:
 - Piel.
 - Función pulmonar.
 - Radiografía de tórax.
 - Alergias.
 - Pruebas específicas de ser necesarias, como ante exposición a nanopartículas metálicas.
 3. **Exámenes médicos post-incidentes** y ante exposiciones descontroladas de nanomateriales como puede ser el caso de derrames o fugas ante la rotura de equipos.
 4. Los trabajadores deben ser capaces de reconocer los **síntomas** que pueden sufrir ante la exposición a determinados nanomateriales.
 5. Debe quedar detallado **por escrito** un informe médico sobre los resultados anteriormente analizados.
 6. El empresario debe de adoptar **medidas** de carácter urgente en el caso de que los resultados médicos las requieran.

Es importante indicar que aún a día de hoy, ante la **inexistencia de protocolos específicos** para gran parte de los nanomateriales, la vigilancia de la salud no tiene la eficacia que sí demuestra ante agentes químicos de un tamaño superior, pero eso no impide que se deba prestar especial atención a aquellos órganos diana que puedan verse afectados de manera directa por la exposición a nanopartículas como son pulmones, riñones, hígado y las distintas células que forman parte del torrente sanguíneo.

XI. Consideraciones finales

Las posibilidades que ofrece la nanotecnología son prácticamente infinitas, pero desafortunadamente el desarrollo de esta tecnología y la investigación sobre sus posibles efectos sobre el ser humano o el medio ambiente no van de la mano, y esta distancia parece que no para de crecer con el paso del tiempo.

Al enfrentarnos ante una escala que, pese a llevar utilizándose durante miles de años ya que ha sido documentada la utilización por parte de los romanos de nanopartículas de oro y plata en trabajos de orfebrería, aún hoy su comportamiento nos sorprende y del que día a día aprendemos algo nuevo, la única medida que sin lugar a dudas nos permitirá no arrepentirnos

en un futuro y sufrir una potencial desgracia como fue el caso del amianto es el «**Principio de precaución**»; otorgar a las nanopartículas una magnitud de riesgo muy elevada hasta que la investigación le otorgue el grado de peligrosidad que corresponde a cada nanomaterial.

Al igual que ante cualquier otro agente químico, la clave para reducir el peligro a estar expuestos a las nanopartículas es no estar en contacto con ellas, ya sea mediante barreras físicas que nos separen o mediante sistemas de ventilación que las alejen de nuestras vías de entrada. No debemos pensar que las únicas medidas de protección a nuestra disposición son equipos de protección individual como guantes o mascarillas.

Los diversos estudios realizados sobre los efectos de los nanomateriales sobre la salud desvelan que los principales efectos que se producen sobre el organismo son de carácter irritante, pero se sospecha que las nanopartículas con forma de fibra pueden aumentar el riesgo de cáncer u otras enfermedades respiratorias, al igual que ocurre con su tamaño a una escala mayor.

El enfoque actual sobre la nanotecnología parece ir en la buena dirección, además de intentar aprovechar al máximo las excelentes propiedades que aportan los nanomateriales, se están tratando de crear mediante tecnologías más limpias y de forma que se proteja lo máximo posible a los que se ven involucrados en el proceso. Aunque para conseguir estos objetivos el camino es aún muy largo, y no se espera que se alcance hasta dentro de unas décadas.

Con esta publicación se pretende dar a conocer esta puntera tecnología, las oportunidades que ofrece y también los riesgos de su uso descontrolado, tanto por los empresarios que los incorporan en sus procesos productivos, sin hacer previamente un balance de riesgo-beneficio, como los trabajadores que no son conscientes de la existencia de nanomateriales en su lugar de trabajo. También se indican las principales medidas preventivas que deben adoptarse en el trabajo para minimizar la exposición a estos materiales, dicha exposición puede tener lugar no sólo en el lugar de trabajo sino también durante el transcurso de nuestra vida cotidiana donde podemos estar expuestos a diversos productos como los humos procedentes de los motores de combustión de nuestros vehículos.

XII. Bibliografía

AGENCIA EUROPEA PARA LA SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (EU-OSHA). (2013). *E-fact 74: Los nanomateriales en el trabajo de mantenimiento: riesgos profesionales y su prevención*. Disponible en: <https://osha.europa.eu/es/publications/e-fact-74-nanomaterials-maintenance-work-occupational-risks-and-prevention>

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN (UNE). (2019). *Método de ensayo para medir la eficacia de los medios de filtración de aire contra los nanomateriales esféricos. Parte 2: Rango de tamaño de partícula de 3 nm a 30 nm*. ISO/TS 21083-2:2019.

CRITCHLEY, L. (2019). «Nanoparticle Manufacture - What Methods Are There?» *Azonano*. Disponible en: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5122>

DUNN, K., TOPMILLER, J., MCCLEERY, T. (2018). «Protecting workers during the handling of nanomaterials». *Centers for Disease Control and Prevention (CDC)*. Disponible en: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/52437>

FUNDACIÓN ESTATAL PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES (FSP). (2017). *Prevención de Riesgos Laborales frente a la exposición de nanopartículas en el Sector de la Construcción*. Disponible en: <https://nanomateriales.lineaprevencion.com/docs/nm/nanomateriales.pdf>

GRIFFIN, S., IRFAN, M., JAWAD, M., SARFRAD, M. (2018). «Natural Nanoparticles: A Particular Matter Inspired by Nature». *National Library of Medicine (NIH)*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5789313/>

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2018). *Dimensión nano desde la toxicología*. Disponible en: https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/ponencias_jt150618_cursoverano/es_def/adjuntos/toxnano%20osalan.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2023). *Estudio sobre la eficacia de guantes y ropa de protección frente a nanopartículas*. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/material-tecnico/documentos-tecnicos/estudio-eficacia-guantes-y-ropa-de-proteccion-frente-a-nanopartículas-2023>

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2014). *Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas. Método Stoffenmanager nano 1.0*. Disponible en: <https://www.insst.es/documentacion/material-tecnico/documentos-tecnicos/evaluacion-del-riesgo-por-exposicion-a-nanopartículas-metodologías-simplificadas-stoffenmanager-nano-1-0-2014>

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2022). *Nota técnica de Prevención 1172. Nanomateriales: Medidas preventivas en laboratorios de investigación*. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/566858/NTP+1172+Nanomateriales.+Medidas+preventivas+en+laboratorios+de+investigaci%C3%B3n+2022.pdf/ea3bd610-e9cb-457e-217a-f9e89bf6c8cc>

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). (2015). *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales*. Disponible en: <https://www.insst.es/seguridad-y-salud-en-el-trabajo-con-nanomateriales>

Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). (2013). *Pictogramme de signalisation pour les nanomatériaux*. Disponible en: <https://www.inrs.fr/media.html?jsessionid=1FA617C51C7AD0492903C53A9456E3CA?reflINRS=outil44>

- Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS).** (2015). *¿Son los nanomateriales un riesgo para mi salud y seguridad en el trabajo?* Disponible en: https://istas.net/sites/default/files/2020-02/Nanomateriales_riesgo_salud.pdf
- Instituto Valenciano de Seguridad y Salud en el Trabajo (INVASSAT).** (2017). *Valores límite y evaluación de la exposición.* Disponible en: <https://invassat.gva.es/documents/161660384/163766431/Valores+l%C3%ADmite+y+evaluaci%C3%B3n+de+la+exposici%C3%B3n/69494441-3d8f-4a13-b0b1-08d1d59f2209>
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).** (2011). *Nanotechnologies - Nanomaterial risk evaluation.* ISO/TR 13121:2011.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).** (2023). *Nanotechnologies - Vocabulary. Part 1: Core terms.* ISO/TS 80004-1:2023.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO).** (2023). *Nanotechnologies - Vocabulary. Part 2: Nano - objects.* ISO/TS 80004-2:2023.
- LENZ, G., VIANA, C., DOMINGUES, D., VIEIRA, F.** (2019). «Risk Assessment and Health, Safety, and Environmental Management of Carbon Nanomaterials». Researchgate. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332778443_Risk_Assessment_and_Health_Safety_and_Environmental_Management_of_Carbon_Nanomaterials
- MOABELO, K., MARTIN, D., FADAKA, A., SIBUYI, N.** (2021). «Nanotechnology-Based Strategies for Effective and Rapid Detection of SARS-CoV-2». *National Library of Medicine (NIH)*. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34947447/>
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH).** (2014). *Guidance for Medical Screening and Hazard Surveillance for Workers Potentially Exposed to Engineered Nanoparticles.* Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-116/>
- ORGANIZACIÓN DE CONSUMIDORES Y USUARIOS (OCU).** (2024). *Nanomateriales en la industria agroalimentaria.* Disponible en: <https://www.ocu.org/alimentacion/seguridad-alimentaria/noticias/nanomateriales-industria-agroalimentaria#:~:text=Los%20nanomateriales%20son%20materiales%20compuestos,mayor%20potencial%20de%20los%20materiales>
- PAL, K., CHAKROBORTY, S., NATH, N.** (2022). «Limitations of nanomaterials insights in green chemistry sustainable route: Review on novel applications». *Degruyter*. Disponible en: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/gps-2022-0081/html?lang=en>

RAMANATHAN, A. (2019). «Toxicity of nanoparticles_ challenges and opportunities». *National Library of Medicine (NIH)*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7818359/>

UNIVERSITY OF NEVADA (UNR). (2023). «Chapter 10: Nanomaterials». Disponible en : <https://www.unr.edu/ehs/policies-manuals/chemical-hygiene-plan/chapter-10>

Vázquez, R., Huerta, A. (2020). «Toxicidad de los nanomateriales de interés biomédico en los sistemas biológicos». *Scielo*. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912018000100065

Visser, M., Gosens, I., Bard, D. (2022). «Towards health-based nano reference values (HNRVs) for occupational exposure: Recommendations from an expert panel». *Sciencedirect*. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452074822000180>

ZHUANG, Z., VISCUSI, D. (2011). «Respiratory Protection for Workers Handling Engineered Nanoparticles». *Centers for Disease Control and Prevention (CDC)*. Disponible en: <https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/category/manufacturing-2/page/3/>