

nano ↑IMPULSA

GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA
EL USO SEGURO DE

NANO MATERIALES





GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

ivACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional

Una manera de hacer Europa

NanoIMPULSA es un proyecto financiado por IVACE, Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial de la Generalitat Valenciana, a través de los Fondos europeos FEDER de Desarrollo Regional, en el marco del programa de ayudas dirigidas a centros tecnológicos con el expediente IMDEEA/2017/96 e IMDEEA/2017/87.

nano
↑MPULSA

INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DEL EMBALAJE,
TRANSPORTE
Y LOGÍSTICA
ITENE



AICE

jtc
UNIVERSITAT
JAVIER I

Contenido

Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas.....	6
Acrónimos.....	7
1. Introducción.....	9
2. Nanotecnología: conceptos generales y aplicaciones.....	11
3. Seguridad y salud aplicada a la nanotecnología.....	20
3.1. Regulación y normativa.....	20
3.2. Conceptos básicos sobre las medidas de gestión de riesgos.....	21
3.2.1. Jerarquía de controles.....	21
3.2.2. Medidas técnicas de control.....	22
3.2.3. Medidas de organización colectiva.....	23
3.2.4. Equipos de Protección Individual (EPIs).....	24
3.3. Evaluación de riesgos y precauciones de seguridad para usos de nanomateriales.....	27
3.3.1. Escenarios y determinantes de exposición.....	27
3.3.2. Evaluación cualitativa de la exposición por inhalación.....	30
3.3.3. Evaluación cuantitativa de la exposición por inhalación.....	32
4. Buenas prácticas para el uso seguro de nanomateriales.....	38
4.1. Eficacia de las medidas comunes de gestión del riesgo frente a la exposición a nanomateriales.....	38
4.1.1. Conocimiento actual sobre la efectividad de los EPIs y MGRs frente a nanomateriales.....	38
4.1.2. Metodología de ensayos desarrollada dentro del proyecto....	42
4.2. Factores de protección y niveles de eficacia basados en los estudios realizados.....	43
4.2.1. Protección respiratoria.....	43
4.2.2. Protección dérmica.....	45
4.2.3. Protección ocular.....	46

4.2.4. Ventilación.....	47
4.3. Tecnologías depuración de emisiones de material particulado.	48
4.4. Criterios de decisión para la selección de estrategias de control de la exposición frente a nanomateriales.....	53
5. Bibliografía	60
5.1. Centros de referencia	60
5.2. Publicaciones	60

Índice de Figuras

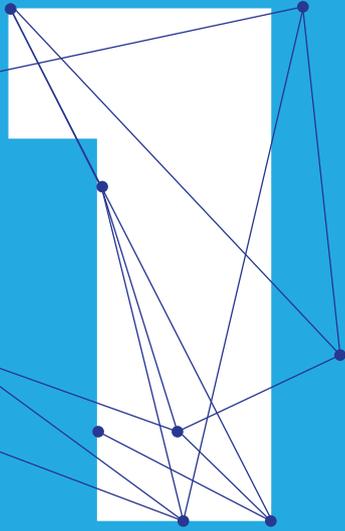
<i>Figura 1. Resumen comparativo de escala de tamaños. European Chemicals Agency (ECHA) © 2016</i>	11
<i>Figura 2. Esquema representativo de nanomateriales manufacturados según ISO.</i>	11
<i>Figura 3. Relación de presencia de nanomateriales en diferentes regiones del tracto respiratorio según tamaño de partícula.</i>	17
<i>Figura 4. Marco regulatorio de nanomateriales y nanoproduetos.</i>	20
<i>Figura 5. Jerarquía de controles</i>	21
<i>Figura 6. Representación de los equipos de protección utilizados generalmente frente a nanomateriales.</i>	24
<i>Figura 7. Clasificación de los tipos de ropa de protección</i>	26
<i>Figura 8. Clasificación de los guantes en función del tiempo de ruptura.</i>	26
<i>Figura 9. Fases de la evaluación del riesgo de la exposición a nanomateriales.</i>	28
<i>Figura 10. Niveles o Tiers de la evaluación de la exposición</i>	30
<i>Figura 11. Zonas de medición en torno a la fuente-receptor.</i>	34
<i>Figura 12. Pasos para la evaluación de la exposición</i>	34
<i>Figura 13. Gráfica de los datos de la Tabla 8. En naranja, los escenarios sin medidas técnicas de control.</i>	35
<i>Figura 14. Dispositivo experimental para evaluar la eficacia de campanas de laboratorio frente a nanomateriales.</i>	47
<i>Figura 15. Porcentaje de fuga de nanomateriales hacia la zona de respiración del trabajador en las diferentes posiciones del plano de la campana.</i>	47
<i>Figura 16. Porcentaje de fuga de nanomateriales hacia el exterior en las diferentes posiciones del plano de la campana.</i>	48
<i>Figura 17 : Dispositivo experimental y telas estudiadas para la evolución de la eficacia de filtración frente a NMs</i>	51
<i>Figura 18 : Eficacias de las telas filtrantes seleccionadas frente a nanopartículas de 40nm</i>	52
<i>Figura 19 : Evaluación de la eficacia de un medio filtrante en función del tamaño de partícula y de la velocidad del gas.</i>	52
<i>Figura 20. Árbol de decisión para la selección de respiradores.</i>	55
<i>Figura 21. Árbol de decisión para la selección general de EPIs.</i>	58

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de materiales comunes según sectores industriales.	16
Tabla 2: Medidas técnicas [29], [45]	22
Tabla 3: Ejemplos de medias de organización colectivas [45]	23
Tabla 4. Resumen de los tipos y características de los equipos de protección respiratoria.	25
Tabla 5: Principales herramientas nanoespecíficas para la evaluación del riesgo profesional y la estimación de los niveles de exposición a nanomateriales.	30
Tabla 6: Características de los equipos de lectura directa [36].....	32
Tabla 7: Características del equipo SENSONANO	33
Tabla 8: Escenarios de exposición evaluados en el proyecto NanoIMPULSA	35
Tabla 9. Estudios publicados sobre equipos de protección respiratoria.....	38
Tabla 10. Estudios publicados sobre ropa de protección.....	39
Tabla 11. Estudios publicados sobre guantes de protección	40
Tabla 12. Estudios publicados sobre medios de filtración respiratoria	40
Tabla 13. Estudios publicados sobre sistemas locales de ventilación extractiva.....	41
Tabla 14. Eficiencias de diferentes tipos de máscaras y filtros de partículas probados para nanomateriales de NaCl en sujetos de ensayo.....	44
Tabla 15. Eficiencias de diferentes máscaras y filtros probados para NPs de SiO₂ en maniquís.....	44
Tabla 16. Eficacia de los trajes protectores frente a nanomateriales	45
Tabla 17. Eficacia de los guantes protectores químicos frente a nanomateriales	46
Tabla 18. Eficacia de las gafas de seguridad frente a nanomateriales.....	46
Tabla 19: Métodos para la separación de partículas en aplicaciones industriales (Peukert et al., 2001).....	49
Tabla 20: Eficacia de sistemas de depuración de emisiones para nanopartículas.....	50
Tabla 21: Características medios filtrantes estudiados.....	50

Acrónimos

BG	<i>Background</i>
CAS	<i>Chemical Abstracts Service</i>
CLP	Clasificación, Etiquetado y Envasado de Sustancias y Mezclas (<i>Classification, Labelling And Packaging</i>)
CPC	Contadores de Partículas por Condensación
DNEL	Nivel Máximo de Exposición para las Personas (<i>Derived No Effect Level</i>)
Dpg	Diámetro Geométrico Medio
EC	Controles de Ingeniería (<i>Engineering controls</i>)
ECHA	<i>European Chemicals Agency</i>
EPD	Equipos de Protección Dermal
EPI	Equipos de Protección Individual
EPP	Equipos de Protección Personal
EPR	Equipos de Protección Respiratoria
ES	Escenarios de exposición (<i>Exposure Scenarios</i>)
ESP	Precipitadores electrostáticos (<i>Electrostatic Precipitators</i>)
HEPA	Filtro de alta eficiencia (<i>High-Efficiency Particulate Air filter</i>)
IL	Fuga Interna (<i>Inward Leakage</i>)
LEV	Ventilación Local Extractiva (<i>Local Exhaust Ventilation</i>)
NIOSH	Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional de USA (<i>US National Institute for Occupational Safety and Health</i>)
NM	Nanomaterial
NP	Nanopartícula
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PEROSH	<i>Partnership for European Research in Occupational Safety and Health</i>
PRL	Prevención de Riesgos Laborales
REACH	Registro, Evaluación, Autorización Y Restricción de Sustancias Químicas (<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>)
REL	Niveles de Exposición Recomendados (<i>Recommended Exposure Levels</i>)
SCA	Área De Recolección Específica (<i>Specific Collection Area</i>)
SST	Seguridad y Salud en el Trabajo
TIL	Fuga Interna Total (<i>Total Inward Leakage</i>)



INTRODUCCIÓN



1. Introducción

Los nanomateriales presentan enormes oportunidades para el crecimiento y el progreso industrial, y constituyen una gran promesa para el desarrollo de productos de gran valor añadido que nos faciliten la vida. No obstante, existen aún importantes lagunas sobre los posibles efectos adversos de los nanomateriales en la salud humana, incluyendo la seguridad laboral, y en el medio ambiente.

La nanoescala, que permite nuevas propiedades beneficiosas y altamente interesantes, también abre las puertas a nuevos o diferentes riesgos potenciales, incluso a largo plazo. Debido a su uso generalizado, los consumidores, los trabajadores y el medio ambiente también pueden verse expuestos a ellos de muchas formas distintas.

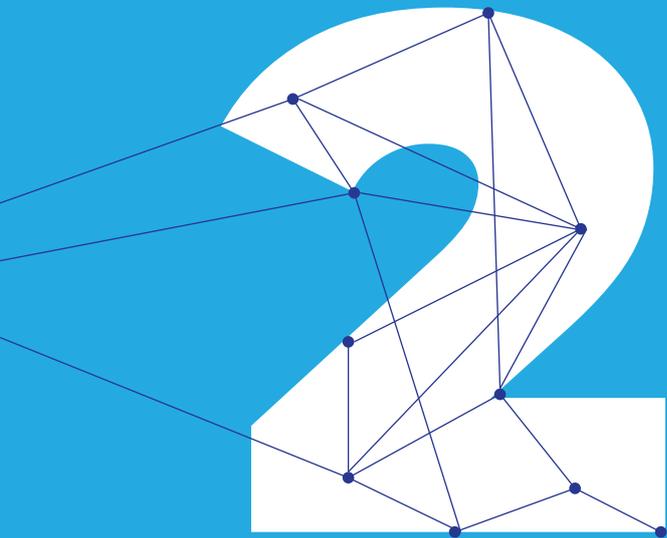
En el ámbito laboral, los trabajadores los manipulan en forma de materias primas en los procesos de fabricación. Cuando se procesan durante el ciclo de vida útil en diversas aplicaciones industriales, muchas más personas los utilizarán, bien en productos como pinturas o bien en artículos, como impresoras. Existe una diferencia entre los productos y artículos que se han fabricado utilizando nanotecnología y los que aún contienen nanopartículas libres cuando se usan.

Resulta difícil formular declaraciones generales sobre los nanomateriales al constituir un grupo muy diverso, por ello deben considerarse de manera individual, al igual que cualquier otra sustancia química, aunque sí pueden realizarse algunas generalizaciones.

La nanoseguridad es, por tanto, clave para impulsar la nanotecnología y hacer un uso responsable y sostenible de los nanomateriales. La caracterización de los nanomateriales es compleja, y los resultados respecto a sus características físicas, químicas y toxicológicas no está armonizada.

En este sentido, y dentro del contexto del proyecto NanoIMPULSA, se ha trabajado en el desarrollo de diversas herramientas enfocadas a evaluar la seguridad del trabajo con nanomateriales en diferentes sectores industriales, con el fin de proporcionar una recopilación de información de calidad para una correcta, segura y sostenible aplicación de la nanotecnología. De esta manera, se pretende colaborar en disipar las dudas y recelos que la aplicación de la nanotecnología a sectores tradicionales pueda suscitar.

En este documento se recogen algunos de los resultados del proyecto NanoIMPULSA relacionados con la seguridad en el trabajo con nanomateriales.



NANOTECNOLOGÍA

CONCEPTOS GENERALES
Y APLICACIONES



2. Nanotecnología: conceptos generales y aplicaciones

Los nanomateriales son, según el marco regulatorio de la Unión Europea, sustancias químicas o materiales cuyas partículas tienen un tamaño de entre 1 y 100 nanómetros (nm) en, al menos, una de sus dimensiones.

La nanotecnología es, por tanto, la tecnología dedicada al estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia en dicha escala.

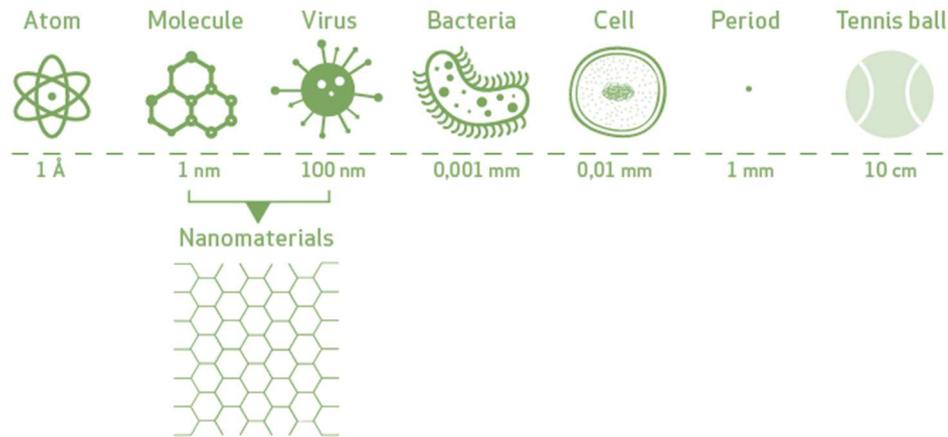


Figura 1. Resumen comparativo de escala de tamaños. European Chemicals Agency (ECHA) © 2016

Los nanomateriales o nanopartículas (NPs) pueden presentarse de forma natural, como polvos o cenizas volcánicas; o pueden ser sintetizados por la industria mediante el uso de la ingeniería a nivel atómico, y entonces también se conocen como nanomateriales manufacturados (o ENMs: engineered nanomaterials) (Figura 2).

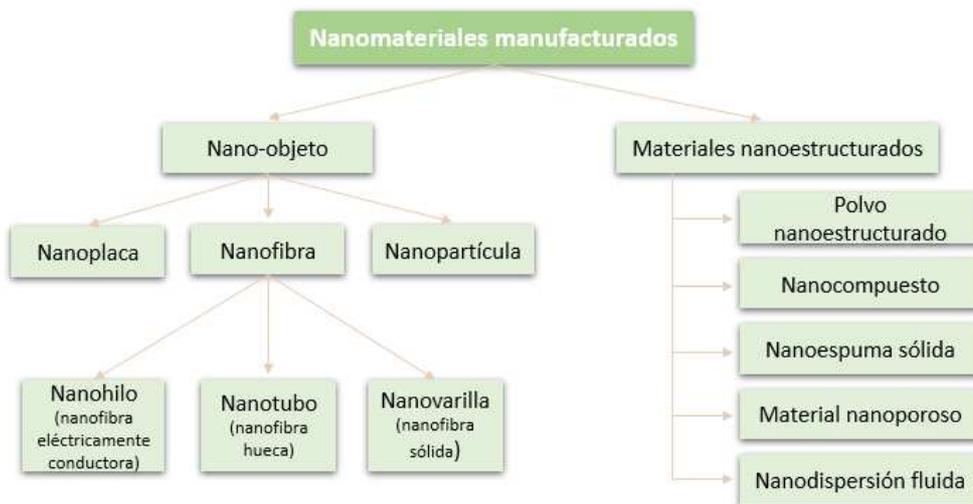


Figura 2. Esquema representativo de nanomateriales manufacturados según ISO.

Además, pueden encontrarse como aerosoles (sólidos o líquidos en el aire), suspensiones (sólidos en líquidos) o como emulsiones (líquidos en líquidos). En estado líquido, las nanopartículas manufacturadas se forman principalmente a partir de reacciones químicas controladas, mientras que las que se forman de manera natural aparecen por la erosión y degradación química de plantas, arcillas, etc.

Existen dos técnicas de formación o fabricación de nanomateriales:

- *Métodos Top down*: descomposición o reducción de partículas de mayor tamaño para alcanzar tamaños inferiores, molienda del material a granel
- *Métodos Bottom-up*: síntesis a partir de nucleación o autoensamblado de partículas pequeñas hasta otras de mayor tamaño

¿Cuál es el interés de los materiales a escala nanométrica?

Debido a la mayor superficie específica por unidad de volumen que se da en los materiales a escala nanométrica, éstos poseen características distintas de las que se dan en el mismo material en la escala no nanométrica o a nivel atómico. Dichas propiedades dependen de su forma, tamaño, características de superficie y estructura interna. Por otro lado, tienen también diferente forma de interactuar entre sí: pueden agruparse o permanecer en estado libre, en función de las fuerzas de atracción o repulsión que intervengan entre ellas. Otros ejemplos de las propiedades son, por ejemplo

- Las nanopartículas suspendidas en gas tienden a pegarse entre sí más fácilmente que en los líquidos.
- Permiten la creación de superficies y sistemas más fuertes, ligeros, "inteligentes", limpios y sostenibles.
- Son capaces de mejorar propiedades mecánicas, térmicas, físicas, químicas, eléctricas, ópticas, antimicrobianas, antioxidantes, etc.
- Pueden ser funcionalizadas o modificadas en superficie, también pueden ser encapsuladas.

La incorporación de nanomateriales permite el desarrollo de materiales de alto rendimiento. Es por ello que son considerados en numerosos sectores industriales, y por tanto, su presencia en nuestra vida cotidiana es ya común.

El campo de aplicación es variado y muy diverso. No obstante, al tratarse de una disciplina relativamente nueva, existen aún un sinnúmero de posibilidades y aplicaciones que necesitan de investigación y desarrollo.

A continuación, se resumen los principales sectores en los que se aplica la nanotecnología, y las propiedades que pueden verse mejoradas:



Energía: especialmente útil en energías renovables, se emplea en baterías de litio, células solares, catalizadores, films semiconductores, molinos de viento, alambres, o baterías recargables de alta potencia.

En este sector, el uso de nanomateriales puede mejorar propiedades como la durabilidad y la resistencia de los materiales, pueden reducir el peso de los mismos, lo que hace que a su vez los productos sean más eficientes. En términos energéticos, son capaces de aumentar

la resistencia térmica, la conductividad eléctrica, y mejoran la eficiencia de conversión de energía. Por tanto, la nanotecnología en este campo puede resultar especialmente útil para lograr un cambio sustancial desde los combustibles fósiles a las energías renovables. Puede suponer un ahorro de energía si se utilizan nanomateriales adecuados no solo para una distribución y transmisión de energía más eficiente, sino también por ejemplo en la construcción de ventanas de vidrio o con componentes electrocrómicos inteligentes capaces de maximizar el uso de energía solar para calentar edificios.



Electrónica: monitores de pantalla plana, transistores, pantallas de alta definición, nanomembranas semiconductoras ultrarrápidas, memorias USB, teclados y carcasas de teléfonos, pantallas flexibles, o tintas conductoras. La electrónica molecular, la nanolitografía, películas extremadamente delgadas y transistores están impulsando la investigación y la tecnología hacia logros muy interesantes. La nanotecnología está abriendo las puertas a una era hiper-tecnológica en la que la electrónica y las tecnologías de la información y la comunicación (TICs) son la clave.

La resistencia de los componentes electrónicos es una de las propiedades que más se beneficia de la aplicación de la nanotecnología, generalmente de nanopartículas basadas en carbono. Concretamente, las nanopartículas otorgan mayor resistencia mecánica, térmica, y resistencia a la tracción. Además, mejora las propiedades viscoelásticas, la eficiencia de conversión de energía o la interferencia electromagnética. De esta forma, permite obtener, entre otros, dispositivos de almacenamiento de datos de menor tamaño, más rápidos y con un menor consumo de energía.



Medio ambiente: catalizadores para la producción de hidrógeno, cápsulas de liberación controlada, nanopartículas bioactivas, filtros para el tratamiento de aguas residuales, fungicidas, o sensores para la monitorización de la contaminación.

La adición de nanopartículas es capaz de mejorar la eficiencia de los catalizadores, o de inducir selectividad para el tratamiento y depuración de ciertos contaminantes. También se utilizan como absorbentes de gases de efecto invernadero u otros gases contaminantes. Las nanomembranas basadas en nanocompuestos con polímeros orgánicos es otra de las aplicaciones de mayor interés y repercusión en el campo medioambiental, constituyendo filtros que actúan a nivel molecular basado en el comportamiento celular.



Automoción e industria aeroespacial: llantas, cascos, chasis, materiales termoeléctricos, paneles solares inteligentes de película fina, convertidores catalíticos, vidrio, aditivos para combustible, baterías recargables de alta potencia.

Es una industria pionera en el uso de nanomateriales, en la que la aplicación que la aplicación de la nanotecnología es, desde hace tiempo, común y muy ventajosa. Las principales propiedades que se ven mejoradas son las relativas a la resistencia de los materiales utilizados para la fabricación de automóviles y de componentes para la industria aeroespacial: aumentan la resistencia mecánica, térmica, al impacto, a la tracción, a la rozadura, o a la abrasión. Aumenta la durabilidad, la propiedad barrera, mejora la interferencia

electromagnética, la flexibilidad, la conductividad eléctrica, la rigidez, o la distorsión térmica. Además, y muy importante, la nanotecnología aplicada a este sector es capaz de reducir el peso y el coste de los materiales.



Plástico (incluido packaging): envases antimicrobianos de alimentos, reforzamiento y funcionalización de polímeros, materiales de alto rendimiento, envases activos, o envases biodegradables o impermeables.

Es ampliamente común el uso de nanomateriales como aditivos en diferentes matrices poliméricas para mejorar, entre otros, las propiedades antimicrobianas, la propiedad barrera o la permeabilidad en el caso de los plásticos destinados a envase de alimentos. Para el sector plástico en general, la nanotecnología se aplica también con el fin de aumentar la barrera a los rayos ultravioleta, así como la resistencia térmica, mecánica, o a la tracción. Mejora además las propiedades de autolimpieza, las propiedades eléctricas o la rigidez. Los termoplásticos reforzados con nanotecnologías resisten el calor, son retardantes de llama, proporcionan estabilidad y conducen la electricidad. Por ejemplo, el nitruro de titanio es un material extremadamente duro utilizado en plásticos, como frascos de tereftalato de polietileno (PET), para mejorar sus propiedades físicas y la eficiencia de los procesos de fabricación de PET.



Vidrio y cerámica: nuevos cristales térmicamente resistentes, cerámicas y vidrios que no se manchan, cerámica con superficies activas, vidriados autolimpiables resistentes al rayado, cristales fotosensibles.

Aditivos basados en nanomateriales aumentan la resistencia tanto del vidrio como de la cerámica. Disminuyen la distorsión térmica, mejoran la durabilidad y las propiedades autolimpiantes.

Textil y calzado: tejidos antimanchas, antiarrugas, aislantes, protectores del agua y del frío, aislantes de agentes químicos, retardantes de llama, deportivos antimicrobianos.



La nanotecnología en este sector también permite reducir el peso de los productos (importante en el caso de materiales de uso deportivo), aumentar la resistencia y la durabilidad, o mejorar la estabilidad, siendo los nanotubos de carbono los más utilizados para tal fin. Algunas prendas infantiles pueden revestirse de nanoplatina para proporcionar protección antibacteriana. El nanodióxido de titanio brinda protección frente a los rayos UV para prendas de baño. Muchas cazadoras de montaña impermeables y manteles antimanchas están recubiertos de nanosílice amorfa sintética. Si se quiere mejorar la resistencia a la abrasión, basta con recubrir las materias textiles de nanoóxido de aluminio, nanotubos de carbono o nanosílice amorfa sintética.

Dos de los usos potenciales de la nanotecnología en el sector textil se deben, por un lado, a la mejora de las propiedades antibacterianas, con gran impacto en hospitales y residencias en los que la contaminación cruzada de bacterias puede ser peligrosa; y por otro ya que podrían utilizarse para el biomonitoreo inalámbrico de funciones vitales a distancia.



Recubrimientos pinturas, tintas, masillas y barnices: recubrimientos fotoactivos, pinturas autolimpiantes y antimicrobianas, resistentes a las inclemencias del tiempo.

Los nanomateriales que aumentan la barrera a los rayos ultravioleta, y que mejoran las propiedades viscoelásticas. En tintas, por ejemplo, una de las aplicaciones más interesantes es la mejora de la conductividad.

En la actualidad, los nanomateriales utilizados en el sector de pinturas y recubrimientos son el dióxido de sílice y el dióxido de titanio a nanoescala. El nanodióxido de titanio se usa en recubrimientos principalmente para explotar su actividad fotocatalítica y proporcionar superficies autolimpiables. La adición de sílice amorfa sintética optimiza la dureza y la resistencia de la pintura a la abrasión, los arañazos y la intemperie. Asimismo, se están estudiando la plata, el óxido de zinc, el óxido de aluminio, el dióxido de cerio, el óxido de cobre y el óxido de magnesio a nanoescala para posibles usos futuros en pinturas.



Metalurgia: aceros de resistencia y flexibilidad mejorada, metales no conductores de la electricidad, superficies resistentes a la corrosión y el rayado.



Cosmética y productos de cuidado personal: cremas solares, maquillajes, productos del cabello, pastas dentales, desodorantes, encapsulación de partículas para tratamiento del envejecimiento de la piel.

Las principales ventajas del uso de las nanopartículas en los productos de cuidado personal son: mejora de la estabilidad de los ingredientes cosméticos (como vitaminas, ácidos grasos insaturados y antioxidantes) mediante su encapsulamiento dentro de las nanopartículas, protección eficaz de la piel frente a los rayos ultravioletas (UV), productos estéticamente agradables (como protectores solares minerales, que utilizan partículas más pequeñas de un mineral activo para aplicarlos sin dejar residuos blancos), actuación de un principio activo en las células u órganos deseados, y liberación controlada de principios activos para prolongar el efecto de un fármaco, un efecto también estudiado dentro del campo farmacéutico.



Materiales de construcción: aerogeles, hormigón reforzado o conductor de electricidad, asfalto, recubrimientos, materiales aislantes, materiales de protección frente a inclemencias del tiempo o superficies autolimpiantes.

Muy interesante la aplicación de la nanotecnología para mejorar la resistencia al impacto, térmica, o a la tracción. Aumenta la rigidez y la protección a los rayos ultravioleta, la resistencia a las inclemencias meteorológicas disminuye la distorsión térmica y puede ayudar a reducir los niveles de gases de efecto invernadero, los óxidos de nitrógeno, o el dióxido de carbono.



Medicina-biotecnología: apósitos para heridas, medicinas, ingeniería de tejidos, prótesis, nanoencapsulación para la liberación controlada de medicamentos, secuenciación genómica, detección precoz de enfermedades, o sistemas de

diagnóstico. También se trabaja en el desarrollo de nanomateriales aplicados al instrumental y a los equipos analíticos utilizados en dicho sector.

La aplicación de la nanotecnología al cuidado de la salud humana ofrece numerosas vías potenciales para mejorar el diagnóstico y la terapia médica, incluso en la regeneración de tejidos y órganos.

A modo de resumen, en la tabla siguiente se muestra una relación de los nanomateriales más comunes en los sectores industriales anteriormente descritos, y su aplicación (Tabla 1).

Tabla 1. Relación de materiales comunes según sectores industriales.

Nanopartículas manufacturadas	Aplicaciones
Derivados del Carbono	
Nanotubos de carbono (CNT) y sus derivados	Electrónica, ordenadores, plásticos, catalizadores, baterías, recubrimientos conductivos, sistemas de purificación de aire, implantes ortopédicos, aeronaves, artículos deportivos, piezas de coche, cemento, cerámica, células solares, textil, materiales plásticos y aditivos poliméricos, recubrimientos
Fullerenos	Eliminación de compuestos organometálicos, tratamientos contra el cáncer, cosmética, imagen de resonancia magnética, agente de contraste para rayos X, terapias antivirales, aditivos poliméricos (raquetas de tenis o pelotas de golf)
Negro de humo	Caucho, pigmentos, aditivo polimérico (carga antiestática)
Óxidos metálicos	
TiO₂	Lociones solares, cosméticos, productos de cuidado de la piel, células solares, colorantes alimentarios, ropa, artículos deportivos, pinturas, cemento, ventanas, recubrimientos electrónicos, biorremediación, productos autolimpiables
ZnO	Productos de cuidado de la piel, revestimientos de botellas, purificación de gases, sensores de contaminantes, productos de autolimpieza, barnices, cerámicas, caucho
CeO₂	Catalizadores de combustión en combustibles diésel, células solares, bombas de oxígeno, recubrimientos, electrónica, vidrio/cerámica, lentes oftálmicas, pinturas de exteriores
Semi-conductores	
Puntos cuánticos	Imágenes médicas, terapias médicas dirigidas, células solares, células fotovoltaicas, telecomunicaciones
Metales	
Fe	Remediación de aguas, eliminación de nitratos en sedimentos y suelo, desintoxicación de plaguicidas organoclorados y bifenilos policlorados
NPs Ag	Textil, sprays desinfectantes, desodorantes, jabones de lavandería, vendas o gasas médicas, filtros de aire, pasta dental, cosmética, instrumentos médicos, ordenadores, móviles, contenedores de almacenamiento de comida, utensilios de cocina, juguetes, aditivos/suplementos alimenticios, accesorios (secadores, limpiadores a vacío, lavadoras, refrigeradores), recubrimientos/pinturas, terapias médicas
Au	Terapias tumorales, films o tintas conductivas, catalizadores, cosméticos, test de embarazo, recubrimientos antimicrobianos, diagnóstico <i>in vitro</i>
Polímeros	
Dendrímeros	Liberación de fármacos, tratamientos tumorales, macroencapsulación, nanolátex, vidrios coloreados, sensores químicos, electrodos modificados

Si bien es cierto que, precisamente por su pequeño tamaño, los nanomateriales ofrecen interesantes ventajas a nivel industrial, tal y como se ha visto anteriormente, también es necesario considerar si precisamente el carácter nanométrico de sus partículas hace que los nanomateriales supongan un riesgo diferente al de las partículas de la misma composición en un tamaño no nano.

Al disminuir su tamaño, aumenta el área superficial y por tanto la reactividad del nanomaterial, pudiendo provocar efectos adversos para la salud, diferentes de los que lo haría el mismo material en tamaño no nanométrico, ya que éste interactúa con el organismo de diferente forma. Además de daños en la salud humana, también podría implicar daños en el medio ambiente, al afectar por ejemplo a organismos acuáticos o del suelo, o bioacumulándose en diferentes matrices ambientales.

Podría decirse, por tanto, que los principales riesgos asociados a nanomateriales estarían principalmente relacionados con el tamaño, pero también con el estado de la partícula.

Además, una vez en el organismo, la distribución de los nanomateriales se ve afectada por una propiedad específica y exclusiva que presentan algunos, llamada "translocación", o capacidad de atravesar las barreras biológicas sin perder su integridad.

Los mayores riesgos de exposición se producen cuando se manipulan partículas en polvo, y ello se relaciona con la principal vía de entrada al organismo se encuentra la *vía inhalatoria*, pudiendo las nanopartículas quedarse depositadas en diferentes regiones del tracto respiratorio, tal y como se muestra en la Figura 3.

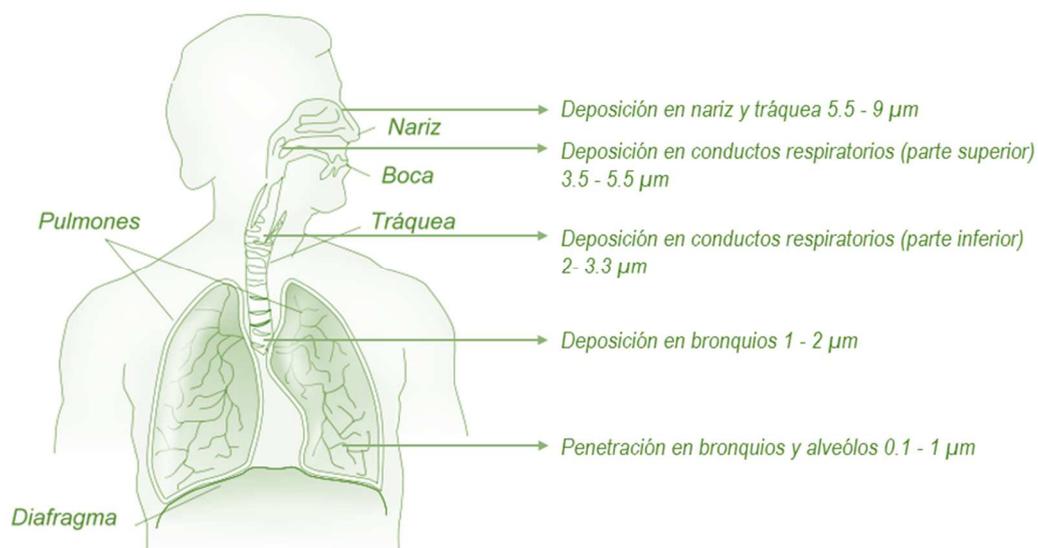
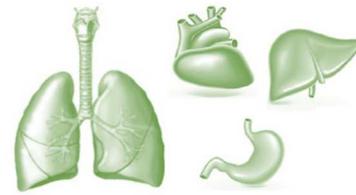


Figura 3. Relación de presencia de nanomateriales en diferentes regiones del tracto respiratorio según tamaño de partícula.

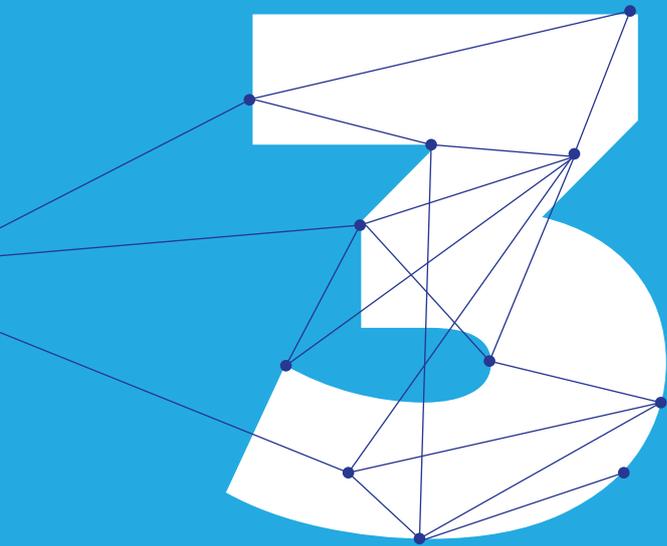
Además de la vía inhalatoria, los nanomateriales también pueden penetrar en el organismo por vía dérmica. La vía digestiva es la menos probable de todas, asociada a falta de medidas higiénicas en su manipulación.

La importancia de considerar las vías de entrada al organismo de los nanomateriales se relaciona con uno de los objetivos de la presente guía: la elección del equipo de protección individual adecuado para cada escenario de uso, tal y como se verá en capítulos siguientes.

A pesar de que los mecanismos y efectos tóxicos derivados del uso y presencia de nanomateriales aún no son suficientemente conocidos, sí puede considerarse que los efectos adversos más importantes observados en estudios *in vivo* se dan en los pulmones, e incluye inflamación, daños en los tejidos, fibrosis y generación de tumores. También se han manifestado efectos en el sistema cardiovascular, en hígado, riñones, o corazón. Los problemas de sensibilización e irritación ocular y dérmica también pueden considerarse habituales, sobre todo en escenarios de exposición laboral.



Una buena evaluación del riesgo en el uso de nanomateriales será clave para garantizar la aplicación y el desarrollo seguro de la nanotecnología. Así pues, para una gestión integral del riesgo es necesaria información sobre las propiedades intrínsecas de los nanomateriales (riesgos) y la probabilidad de exposición/liberación en un compartimento específico (es decir, lugar de trabajo, agua dulce, agua marina, sedimentos o suelos, tratamiento de aguas residuales y aire) y datos de dosis-respuesta (es decir, Nivel sin efecto derivado o DNEL, PNEC - Concentración sin efecto pronosticada).



SEGURIDAD Y SALUD

APLICADA A LA
NANOTECNOLOGÍA



3. Seguridad y salud aplicada a la nanotecnología

3.1. Regulación y normativa

En la Comunicación de la Comisión sobre Aspectos Reglamentarios de los Nanomateriales [34] y en el Documento de Trabajo de los Servicios de la Comisión [33] se puede encontrar información sobre el modo en que la reglamentación de la UE se aplica a los nanomateriales.

Estos documentos concluyen que es necesario adaptar la legislación actual a medida que aumenta la profundidad del conocimiento científico sobre las nanopartículas. No obstante, en la legislación europea no existe un marco específico para nanomateriales, excepto para regulaciones de sectores concretos que sí contienen especificaciones para ellos (cosmética, o materiales en contacto con alimentos).

La normativa relativa a los nanomateriales se basa actualmente en las leyes y reglamentos vigentes aplicables a los productos químicos. Los marcos regulatorios que se encuentran aplicables de acuerdo con la Segunda Revisión Regulatoria sobre nanomateriales (octubre de 2012) se muestran en la Figura 4.

Según la información facilitada en la citada Comunicación, todos los nanomateriales se consideran sustancias químicas y deben cumplir los requisitos establecidos en el Reglamento REACH [74] y el Reglamento (CE) nº 1272/2008 CLP (clasificación, etiquetado y embalaje [73]).



Figura 4. Marco regulatorio de nanomateriales y nanoproducidos.

Recientemente ha entrado en vigor una modificación de los anexos del Reglamento REACH, la cual sí establece nuevas obligaciones específicas: información sobre la pulverulencia (factor crítico en la exposición ocupacional), y la actualización de las aplicaciones informáticas con aspectos relativos a nanomateriales.

Además de la normativa REACH, existen varios instrumentos legales para garantizar un nivel adecuado de protección de los trabajadores. El marco general lo establece el Reglamento sobre seguridad y salud en el trabajo de los trabajadores (Directiva marco 89/391/CEE - SST de 12 de junio de 1989 [12], relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo). No obstante, uno de los retos a superar es la definición, armonizada y oficial, de valores límite de exposición ocupacional (OELs) específicos para nanomateriales.

Actualmente se están llevando a cabo varias actividades para apoyar la definición de un marco regulador para nanomateriales y productos que los contienen. Dichas iniciativas han sido iniciadas por diversos y relevantes organismos, como la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), con el objetivo de impulsar un desarrollo armonizado en el ámbito nanotecnológico a nivel mundial.

El último aspecto regulatorio a considerar es que, aunque sí existen requisitos legales a nivel europeo formulados a partir de normas para los equipos de protección individual (EPIs) -normas de protección respiratoria, normas para guantes de protección, normas de protección de la ropa, normas de protección de los ojos-, ni los equipos de protección individual, ni los sistemas de ventilación actualmente comercializados y utilizados, se certifican considerando la escala nanométrica, lo que constituye otro de los principales retos en la nanotecnología.

3.2. Conceptos básicos sobre las medidas de gestión de riesgos

3.2.1. Jerarquía de controles

Proteger la salud de los trabajadores es clave para minimizar las exposiciones a sustancias peligrosas en el lugar de trabajo. En este marco, la aplicación de un correcto programa de gestión de riesgos, como la jerarquía de control establecida en la Directiva de Agentes Químicos (Directiva 98/24/CE, [11]), es fundamental.

La jerarquía de control [31] es un enfoque sistemático para administrar la seguridad en los lugares de trabajo, ya que ofrece una estructura para seleccionar las medidas de control para eliminar o reducir el riesgo de ciertos peligros, los cuales son identificados en las diferentes operaciones y/o procesos que se dan dentro de una empresa para una actividad concreta (Figura 5).



Figura 5. Jerarquía de controles

Esta aproximación supone, por tanto, un enfoque de gestión de riesgos basado en la implementación de medidas estratégicas, técnicas, organizativas y personales. No obstante, la combinación de todas ellas es lo recomendado con el fin de obtener el nivel de protección requerido.

En los subcapítulos siguientes se da una información más exhaustiva sobre las medidas técnicas y los equipos de protección recomendados en el uso de nanomateriales.

3.2.2. Medidas técnicas de control.

Ante la imposibilidad de eliminar, sustituir o aislar un peligro en el control de la exposición frente a nanomateriales es necesario, siguiendo la jerarquía de controles, recurrir al uso de medidas técnicas de control (Tabla 2). El principal objetivo de las medidas técnicas es proteger al trabajador limitando la propagación o eliminando mediante la captura o neutralización las sustancias peligrosas.

Los sistemas de extracción localizada son probablemente las medidas técnicas más frecuentemente utilizadas en la industria. Un sistema de extracción localizada tiene como objetivo captar el contaminante en el lugar más próximo posible del punto donde se ha generado (foco), evitando que se difunda a la zona de exposición del trabajador. La selección del sistema de ventilación más adecuado dependerá del proceso, la peligrosidad del contaminante, de la fuente a controlar y de los límites de exposición del correspondiente nanomaterial. Estos sistemas suelen contar de tres elementos básicos interconectados:

- *Elemento primario de captación:* con geometría y disposición adecuadas para el encerramiento, recepción o captación del flujo emisivo.
- *Equipo de depuración:* cuando la concentración, peligrosidad u otras características del contaminante lo aconsejen, se insta a tratar la corriente contaminada con los sistemas de depuración de aire adecuados con el fin de proteger el medio ambiente atmosférico.
- *Ventilador:* proporciona los caudales necesarios para llevar a cabo con éxito la operación.

Tabla 2: Medidas técnicas [29], [45]

		Tipos		Ejemplos	
MEDIDAS TÉCNICAS	Control sin ventilación		Reduce o elimina la emisión del proceso, y puede ser utilizada junto con sistemas de ventilación para mejorar el nivel de protección. Unos de los sistemas sin ventilación más utilizados es la cabina de guantes.		
	Ventilación	General o por dilución	El fundamento de la técnica es el suministro y extracción del aire de un local de forma natural o mecánica con el fin de sustituir el aire de características no deseables por otro de características adecuadas.		
		Extracción localizada	Vitrinas/Cabinas	Foco de emisión situado en el interior de sus límites geométricos. Cierra completa o parcialmente el proceso.	
			Captadores	Se sitúan adyacentes al foco de emisión, el cual queda localizado fuera de los límites geométricos del elemento captador. Éste debe generar un flujo de aire suficiente alrededor de la fuente para extraer el contaminante. Pueden ser fijos o móviles.	
	Receptores	Foco de emisión situado fuera de los límites del elemento receptor. La entrada de aspiración se sitúa perpendicularmente a la dirección de la emisión, recibiendo el contaminante en la misma velocidad y dirección. Pueden ser fijos o móviles.			

Todas las medidas técnicas de control deberían de someterse a un plan de mantenimiento, limpieza y conservación para garantizar un funcionamiento adecuado. Si, por ejemplo, se produjera una saturación de filtros en un sistema de extracción, este dejaría de ser eficaz, con el agravante de que daría una sensación de falsa seguridad. Además, durante estas tareas se puede producir una exposición al contaminante que deberá ser tenida en cuenta.

3.2.3. Medidas de organización colectiva

Por otro lado, las medidas de organización colectiva son aquellas acciones que, por si solas o en combinación de otros tipos de controles, son capaces de reducir la exposición de los trabajadores frente a un peligro. Estas medidas de control son menos empleadas debido a la dificultad de aplicación, mantenimiento y limitaciones, por lo que se suele preferir la aplicación de los sistemas de protección personal. En la siguiente Tabla 3, se indican algunos ejemplos de medidas de organización colectiva:

Tabla 3: Ejemplos de medidas de organización colectivas [45]

MEDIDAS DE ORGANIZACIÓN COLECTIVA	Prácticas laborales	Desarrollar e implementar procedimientos de trabajo.
		Formar y educar a los trabajadores sobre los procedimientos.
		Establecer planes de buenas prácticas.
		Mantener y almacenar los equipos en buenas condiciones.
	Mantenimiento	Optimizar el espacio de almacenamiento.
		Eliminar el polvo y la suciedad.
		Mantener en buenas condiciones las instalaciones para los empleados.
	Prácticas de higiene personal	Realizar actividades periódicas de mantenimiento y limpieza de las herramientas y equipos para mantener su eficiencia.
		Lavarse las manos después de manipular el material y antes de comer, beber o fumar.
	Educación en EPIs	Evitar tocarse la cara con las manos contaminadas.
		Cómo colocarlo correctamente, ajustarlo, usarlo y quitárselo.
	Planes de emergencia	Mantenimiento, vida útil y eliminación adecuados de EPIs.
		Practicar periódicamente la capacidad de respuesta ante emergencias.
		Prevenir accidentes y lesiones.

3.2.4. Equipos de Protección Individual (EPIs)

Los Equipos de Protección Individual (EPIs) o Personal (EPPs) son el último recurso de la jerarquía de controles anteriormente expuesta y sólo debe recurrirse a ellos cuando las demás medidas de control no aseguran un nivel adecuado de protección al trabajador. Las exigencias mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización de EPI se encuentran recogidas en el Real Decreto 773/1997 [72], indicando, además, el marcado CE de conformidad el cumplimiento del EPI con este real decreto.

No obstante, a pesar de que la selección, uso y mantenimiento del EPI apropiado es crítica para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, ninguna combinación única de EPIs es capaz de garantizar que el equipo sea adecuado para cualquier situación o usuario. Por lo tanto, el EPI debe utilizarse junto con otros métodos de protección.

Existen muchos tipos de EPIs, cada uno de ellos con aplicaciones específicas y requisitos de uso, aunque las implicadas en la protección frente a nanomateriales son principalmente los equipos de protección respiratoria, para ojos y cara, y protección dermal (cuerpo y manos), resumidos gráficamente en la

Figura 6. Dentro de cada tipo, se clasifican según el nivel de protección ofrecido. El factor de protección se define como la capacidad del dispositivo de protección para reducir los niveles de exposición a niveles aceptables. Este factor de protección se calcula comúnmente como la relación entre la concentración del contaminante fuera de la pieza de protección y la concentración en el interior del dispositivo de protección funcionando correctamente.



Figura 6. Representación de los equipos de protección utilizados generalmente frente a nanomateriales.

Equipos de protección respiratoria:

Tienen como finalidad la protección del trabajador frente a la inhalación de sustancias peligrosas. Existen dos categorías principales:

- *Equipos aislantes*, suministran el aire respirable procedente de una fuente independiente (por ejemplo, aire comprimido) o de una fuente no contaminada.
- *Equipos filtrantes*, proporcionan el aire mediante la retención en un medio filtrante de los contaminantes presentes antes de que sea inhalado.

El filtro puede ser para protección contra partículas, gases / vapores y filtros combinados, para ambos casos. En el caso de las partículas, se pueden retener mediante distintos mecanismos (sedimentación, tamizado, impacto inercial, interceptación, difusión, atracción electrostática) cuando se emplean medios filtrantes constituidos por materiales fibrosos.

Asimismo, existen múltiples tipos de máscaras (Tabla 4) según su uso sea de una sola vez (autofiltrantes) o reutilizables, y según cubran sólo la parte inferior de la cara (media máscara o semimáscara), o incluyan también los ojos (máscara facial completa).

Tabla 4. Resumen de los tipos y características de los equipos de protección respiratoria.

Pieza facial		Suministrador de aire respirable	
Reutilizables	Máscara completa		Filtro 
	Media máscara		
Deshechables	Autofiltrantes		AX Gases y vapores de compuestos orgánicos con PE ≤ 65 °C (acetona, ...) NO REUTILIZABLE
			A Gases y vapores de compuestos orgánicos con PE > 65 °C (etanol, glicerina, tolueno, ...)
			B Gases y vapores inorgánicos (ác. nítrico) E SO2 y gases ácidos K Amoniac y sus derivados (amoniaco) Hg Vapores de mercurio NO Gases nitrosos, incluido el NO SX Gases específicos P Partículas
			P1 Filtra al menos el 80% de las partículas en suspensión
			P2 Filtra al menos el 94% de las partículas en suspensión
			P3 Filtra al menos el 99,95% de las partículas en suspensión

Equipos de protección dérmica:

Ropa de protección química

Dependiendo del diseño, hay dos tipos principales de ropa de protección, clasificados en 6 niveles dependiendo de su nivel de protección:

- *Prendas de cuerpo parcial*, como batas, chaquetas, mangas, pantalones, delantales, capuchas, polainas, etc., que cubren sólo una parte del cuerpo.
- *Trajes de trabajo y monos*, que cubren todo el cuerpo y pueden incluir capucha.

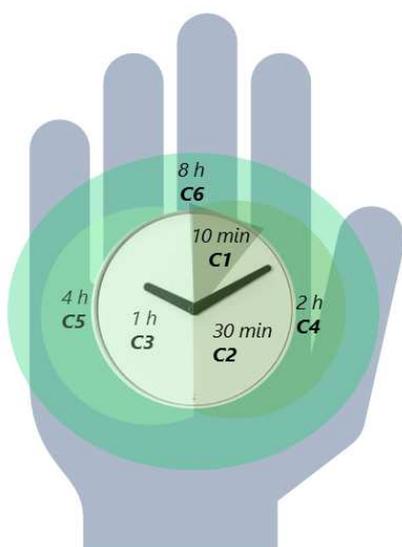


Figura 7. Clasificación de los tipos de ropa de protección

En el caso de la ropa de protección, se tienen en cuenta la resistencia a la penetración y la permeación, que determinan los índices de penetración, absorción y repelencia del material expuesto a los contaminantes. Asimismo, existen múltiples tipos de materiales que componen la ropa de protección, dividiéndose principalmente en materiales tejidos (algodón, poliéster) o no tejidos (polietileno, polipropileno).

Guantes de protección química

Los guantes de protección usados frente a riesgo químico suelen ser de dos tipos: reusables o de un solo uso, siendo estos los más comunes a nivel laboratorio. Son impermeables al aire y están fabricados en una amplia gama de elastómeros, incluyendo nitrilo, cloruro de polivinilo (PVC), neopreno, alcohol polivinílico (PVA), látex de caucho natural, laminado o butilo.



El nivel de protección del guante contra un producto químico se determina en base al tiempo de resistencia del material a la permeación del producto a través del mismo en condiciones de laboratorio. Este parámetro es diferente y no debe confundirse con el tiempo de uso recomendado de un guante. La clasificación así obtenida se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Clasificación de los guantes en función del tiempo de ruptura.

Protectores para ojos y cara

De la misma forma, existen varios tipos de protectores para los ojos y la cara dependiendo de la combinación de EPIs usada, del material al que se está expuesto (partículas en vuelo, polvo, chispas o salpicaduras, por ejemplo) y del nivel de protección requerido:

- *Lentes de seguridad*: gafas de laboratorio de montura universal.
- *Gafas de seguridad*: tipo "buceo", protección ocular ajustada sujetas por una goma alrededor de la cabeza.
- *Escudos faciales*: se extienden desde las cejas hasta debajo de la barbilla y a lo largo de todo el ancho de la cabeza del empleado.

Actualmente, el nivel de protección ofrecida por los EPIs durante la exposición a nanomateriales es aún cuestión de debate y estudio, principalmente debido a que no existen normas armonizadas específicas para verificar estos niveles de protección.

En este sentido, son muchos los estudios enfocados a la normalización de los requisitos mínimos exigibles a estos equipos. La correcta selección de los equipos de protección individual es fundamental, ya que la protección efectiva sólo se consigue mediante el ajuste, uso y mantenimiento adecuados del EPI.

3.3. Evaluación de riesgos y precauciones de seguridad para usos de nanomateriales

3.3.1. Escenarios y determinantes de exposición

La evaluación de la exposición en el lugar de trabajo es, como ya se ha visto, clave para garantizar la seguridad en el uso de nanomateriales. Para considerar todos los posibles riesgos que puede entrañar el manejo de nanopartículas, son varios los factores que, desde las diferentes organizaciones y la comunidad científica, se recomienda considerar: propiedades y características de los propios materiales, así como otros factores relacionados, por ejemplo, con las características de las instalaciones y el proceso o la forma de manejo de dichos productos es lo que se considera como "*determinantes de exposición*".

Generalmente, los *determinantes de exposición* se definen como todos aquellos factores que afectan directamente al nivel de exposición. La consideración de todos los determinantes que se dan para una actividad concreta en la que se emplea un determinado nanomaterial permite elaborar un "*escenario de exposición*". La identificación de dicho escenario de exposición es el paso previo para la selección de las mejores medidas de control dentro de un enfoque de gestión del riesgo.



Figura 9. Fases de la evaluación del riesgo de la exposición a nanomateriales.

A continuación, se muestra una relación de los principales determinantes de exposición:

a) Características del material

Las diferentes propiedades de las sustancias, es decir sus propiedades físico-químicas, son relevantes para estimar las emisiones. Una caracterización sistemática de estos factores nos ayuda a definir el *potencial de emisión de la sustancia*, que entra en juego en el momento de estimar cuantitativamente el nivel de exposición. Este potencial, depende del tipo de sustancia que estamos considerando y, en particular, de su estado físico.

-*Tamaño de partícula*: las partículas más pequeñas se difunden más rápidamente en el aire, y pueden penetrar con más facilidad en el tracto respiratorio.

-*Estado físico*: partículas en estado sólido -polvo- están más disponibles en el ambiente del trabajo que las partículas embebidas, al tener mayor movilidad.

-*Estado polvoriento (dustiness)*: parámetro importante en sustancias sólidas. Tendencia de una sustancia a generar partículas en suspensión. Cuanto mayor sea dicha capacidad, mayor será la probabilidad de exposición. Riesgo más alto de exposición por inhalación está asociado a polvos secos, y disminuye drásticamente cuando se incorpora la sustancia en una masa densa o sólida.

-*Viscosidad*: parámetro importante en sustancias líquidas. En productos viscosos, las partículas están unidas con mayor fuerza, lo que hace menos probable la liberación de nanopartículas por aerosolización.

-*Humedad*: mayores humedades reducen el potencial de emisión, ya que la capa líquida en la superficie de las partículas hace que aumenten las fuerzas entre ellas.

-*Fracción de peso / dilución*: a mayor pureza de la sustancia, mayor probabilidad de exposición.

-*Solubilidad*: determinante en la biopersistencia y biocinética de la sustancia. A mayor solubilidad de la partícula, más facilidad en su transporte (a través del organismo, o a través de las matrices ambientales).

b) Características del proceso

Las características del proceso también afectan directamente la emisión de nanopartículas de la fuente. Las más relevantes son:

-*Tipo de proceso*: existe un potencial de emisión relacionado con la actividad dependiente de la energía aplicada a la sustancia. En procesos dinámicos, más probabilidad de liberación.

-*Cantidad de sustancia utilizada*: en las mismas condiciones, en un proceso en el que se emplea mayor cantidad, la probabilidad de liberación será mayor.

-*Duración de la actividad*: mayores tiempos de manejo se relacionan con mayores niveles de exposición.

c) Características de las instalaciones

Las características de la instalación donde se manipula el nanomaterial, a diferencia de las que hemos visto hasta ahora, no influyen en las emisiones directas de la fuente sino en la manera en la que la sustancia contaminante se dispersa en el ambiente circundante

-*Volumen de la instalación*: el nivel de exposición variará dependiendo del tamaño de la instalación en la que se realiza el proceso.

-*Aislamiento de la fuente*: regulado entre el flujo de aire intercambiado entre las dos regiones que se distinguen en un lugar de trabajo (campo cercano -próximo al trabajador que manipula nanopartículas-, y campo lejano -el resto del espacio del lugar de trabajo-). Las medidas de control aplicadas en la proximidad de la fuente son claves para hacer que el flujo entre las dos regiones sea bajo, y por tanto que no se produzca dispersión de las partículas.

-*Ventilación*: si la ventilación es adecuada, contribuirá a bajar los niveles de concentración de nanopartículas en el lugar de trabajo.

-*Humedad relativa*: el nivel de humedad en el interior de la instalación tiene un impacto significativo en los niveles de exposición a partículas con tamaño en el rango del nano, debido a su influencia sobre fenómenos como aglomeración y agregación. El comportamiento de las nanopartículas varía mucho dependiendo del nivel de aglomeración/agregación. Las partículas en suspensión no agregadas se comportan de manera parecida a un gas, difundiéndose rápidamente a grandes distancias. Por otro lado, una vez agregadas o aglomeradas no permanecerán en el aire mucho tiempo antes de sedimentar, reduciendo así la concentración en el aire y la probabilidad de ser inhaladas.

-*Concentración de nanopartículas en el fondo*: para establecer la cantidad de nanomateriales que se desprenden de la fuente durante un determinado proceso, y de consecuencia su potencial nivel de peligrosidad para el trabajador es útil saber el nivel de concentración de nanopartículas en el aire cuando no se está llevando a cabo ninguna tarea, es decir la *concentración de fondo*.

3.3.2. Evaluación cualitativa de la exposición por inhalación

Según la Guía de Agentes Químicos [24], los métodos cualitativos o métodos simplificados de evaluación no están concebidos como una alternativa a la evaluación cuantitativa de la exposición a agentes químicos, sino como una herramienta adicional para el proceso de evaluación para realizar una primera aproximación o diagnóstico sobre la situación, siendo el uso de algunas de estas herramientas sugerido por la ECHA en sus guías técnicas [14], [15].

Los modelos matemáticos para la estimación de la exposición pueden ser utilizados para simular la emisión de una fuente y el transporte en el ambiente de trabajo. Sin embargo, cuando los modelos para sustancias químicas existentes se aplican a nanomateriales, surgen serias dificultades, principalmente debido a la escasez de datos de partida del comportamiento tanto de las características fisicoquímicas del nanomaterial como de las características del proceso, de ahí que se desarrollen paralelamente a la exposición cuantitativa.

La estimación de la exposición puede llevarse a cabo a diferentes niveles (o, en inglés, Tiers), empezando por un nivel más exploratorio y cualitativo para derivar el escenario menos favorable, hasta llegar a un método cuantitativo basado en valores preventivos de referencia o de medidas directas ().



Figura 10. Niveles o Tiers de la evaluación de la exposición

En los últimos años, varios modelos para la evaluación del riesgo profesional han sido desarrollados. La Tabla 5 ofrece un resumen de las herramientas nanoespecíficas para la evaluación del riesgo laboral más utilizadas.

Tabla 5: Principales herramientas nanoespecíficas para la evaluación del riesgo profesional y la estimación de los niveles de exposición a nanomateriales.

ANSES [63]
Herramienta de <i>control banding</i> válida para sólidos, líquidos, polvos y aerosoles. Solapando las bandas de exposición con las de peligrosidad, se obtienen las de riesgo, que contienen distintos "niveles de control", que indican el tipo de solución técnica que se debería implementar para la prevención del riesgo.
CENARIOS® [86]
El primer sistema certificado de gestión de riesgo diseñado específicamente para empresas que utilizan nanomateriales desarrollado en 2006 por The Innovation Society Ltd. (Suiza) y TÜV SÜD (Alemania). Está compuesto por tres módulos: evaluación del riesgo, monitorización del riesgo a 360° y gestión y comunicación.

NanoRiskCat [27] [28]	Tier 0
Es un inventario de productos que contiene nanomateriales. A cada uno se asocia cinco indicadores de distintos colores asociados al nivel de riesgo o de peligrosidad: potencial de exposición para el usuario profesional, para el consumidor y el medioambiente, potencial de riesgo en humanos y en el medioambiente.	
The Swiss Precautionary Matrix for synthetic nanomaterials [32]	Tier 0
Se basa en un número limitado de parámetros (tamaño de la partícula, su estabilidad/reactividad, su potencial de emisión y la cantidad de nanomaterial, etc). que sirven para determinar las necesidades de los trabajadores, de los consumidores y del medioambiente en el campo de la prevención.	
LICARA NanoSCAN [90]	Tier 1
Herramienta genérica que no requiere información específica sobre el nanomaterial, pero constituye un punto de partida para una evaluación semi-cuantitativa del riesgo. Tiene como objetivo guiar las PYMEs en el proceso de toma de decisiones con respeto a los nanomateriales y reevaluar nanoprodutos existentes para proponer mejoras.	
CB Nanotool 2.0 [65] [98] [99]	Tier 1
Es una herramienta de <i>control banding</i> . A cada nanomaterial se asignan dos tipos de puntuaciones basados en diferentes tipos de características fisicoquímicas y toxicológicas y la probabilidad de exposición. De la combinación de las dos puntuaciones se obtienen 4 niveles de caracterización del riesgo y las consecuentes medidas de gestión del riesgo.	
Stoffenmanager Nano [13]	Tier 2
La herramienta de <i>control banding</i> combina las informaciones disponibles sobre la peligrosidad de una sustancia con una estimación de la exposición por inhalación, así la sustancia se clasifica en una específica banda de riesgo.	
NanoSafer [37]	Tier 2
Es una herramienta combinación de <i>control banding</i> y gestión de riesgo. Permite una evaluación del nivel de riesgo y la recomendación de medidas de control de la exposición asociadas con producción de nanomateriales y de productos que los contienen, así como de las emisiones accidentales debidas a procesos que originan nanopartículas.	
GuideNano Tool [53]	Tier 2
La herramienta se apoya a una amplia base de datos de medidas experimentales y características toxicológicas, siendo capaz de proporcionar una gran cantidad de información relevante para la evaluación del riesgo asociado al escenario.	

En NanoIMPULSA se ha implementado un modelo matemático basado en el modelo de NanoIMPULSA para la estimación de la exposición del trabajador a nanomateriales se basa en el método de dos cajas fuente-receptor (campo cercano y lejano) propuesto por primera vez por Cherrie et al. [10] y constituye una revisión del modelo recientemente desarrollado por Tsang et al. [89], y M. Nicas [60], con las correcciones para ventilación introducidas por Ganser & Hewett [18]. Es un modelo que trabaja con valores cuantitativos en cuanto a niveles de exposición, pero en el que las características del nanomaterial como pulverulencia, viscosidad, nivel de humedad, etc. se determinan de forma cuantitativa (5 niveles para el estado polvoriento: "muy alto", "alto", "medio", "bajo", "muy bajo) con el fin de que los datos que en ocasiones no son tan conocidos por el usuario se puedan completar de forma aproximada.

3.3.3. Evaluación cuantitativa de la exposición por inhalación

De acuerdo con el Real Decreto 374/2001 [71], la evaluación cuantitativa de la exposición por inhalación a partículas en suspensión requiere la medición de la concentración en masa de las fracciones relacionadas con la salud (inhalable, torácica y respirable) y su comparación con el correspondiente Valor Límite Ambiental (VLA).

Sin embargo, en la actualidad no hay límites de exposición profesional aplicables a nanomateriales en España, únicamente existen valores límite propuestos por diferentes organizaciones internacionales de conocido prestigio (NIOSH, BSI, IFA, SER). Además, la comunidad científica todavía no ha llegado a un consenso sobre cuál es la métrica (número de partículas, área superficial, masa de las partículas) que mejor se relaciona con los efectos toxicológicos causados por los nanomateriales.

Por consiguiente, la evaluación de la exposición a nanomateriales no se puede realizar del mismo modo que se lleva a cabo para las fracciones inhalable y respirable. No obstante, la medición del número de partículas, del área superficial o de la masa de las partículas en el aire presenta una serie de ventajas frente a una evaluación cualitativa:

- Realización de una evaluación de exposición personal
- Identificación de las principales fuentes de emisión para establecer un plan de control selectivo
- Evaluación de la eficiencia de los sistemas de control técnicas adoptadas, así como la identificación de cualquier fallo o deterioro en las mismas.

A continuación, se presentan los equipos existentes para la caracterización y medición de nanomateriales y se describe una metodología para la caracterización de las emisiones de nanopartículas en el lugar de trabajo.

Equipos para la detección de nanopartículas en el aire

Actualmente, existen en el mercado equipos (Tabla 6) cuyo fundamento de la técnica de medida utilizado es distinto y que permiten obtener información sobre el número de partículas, área superficial, distribución de tamaño en número, etc.

Tabla 6: Características de los equipos de lectura directa [36]

Equipo	Parámetro de media ⁽¹⁾	Rango de tamaño (nm)	Técnica de medida
Contador de partículas por condensación (CPC)	Número de partículas	10-1000	Se condensa vapor sobresaturado sobre las partículas muestreadas que crecen rápidamente y se pueden detectar utilizando métodos ópticos
Cargador por difusión (DC)	Área superficial	10-1000	El aire muestreado se ioniza al pasar a través de un ionizador de corona y los iones positivos se unen a las partículas. Las partículas cargadas se recogen en el filtro de un electrómetro donde se mide la corriente eléctrica.
Separador de barrido de las partículas movilidad (SMPS)	Distribución de tamaño en número	3-800	Las partículas se cargan, se separan en un campo eléctrico en función de su movilidad eléctrica y se cuenta el número de partículas en cada intervalo de tamaño mediante un CPC.
Contador de partículas óptico (OPC)	Distribución de tamaño en número	300- >5000	La radiación láser incide en las partículas, el fotodetector detecta la luz dispersada y la convierte en señal eléctrica.

⁽¹⁾ Además del parámetro de medida mostrado en la Tabla 6, algunos de estos equipos permiten la estimación indirecta de otros parámetros mediante cálculo.

En el marco del proyecto NanoIMPULSA se ha desarrollado un equipo portátil y de bajo coste, para la monitorización de los niveles de concentración de nanopartículas con un software de fácil interpretación, con el fin de promover la evaluación cuantitativa de los escenarios de exposición en las empresas. En la *Tabla 7* se detallan las características del CPC desarrollado, cuyo nombre comercial es SENSONANO.

Tabla 7: Características del equipo SENSONANO

CPC-SENSONANO	
Características	Descripción
Rango de medida	0 - 5000000 #/cm ³
Rango de tamaño detectable	10 nm – 2,5 µm
Rango de temperatura de operación	0 - 40 °C
Tiempo de respuesta	< 4 s
Solvente condensador	n-butanol o alcohol isopropílico
Consumo	< 5 ml/día

Metodología para la caracterización de las emisiones de nanopartículas en los ambientes de trabajo

A pesar de no existir una metodología estandarizada para la detección y caracterización de nanomateriales en el lugar de trabajo, existen diferentes procedimientos definidos por diversos grupos de trabajo especialistas en higiene ocupacional [1], [6], [54], [64], [69]. Todos ellos identifican la necesidad de un enfoque escalonado para facilitar las evaluaciones, que sea un método económico, basado en métodos de medición establecidos, capaces de discriminar las partículas provenientes de fondos, y que permita obtener resultados comparables independientemente de los escenarios de estudio.

A partir de estas premisas se plantea la siguiente metodología para la caracterización de las emisiones de nanopartículas en los ambientes de trabajo:

1) Evaluación inicial

El objetivo de esta etapa es evaluar si es posible eliminar las fuentes que emiten nanopartículas. Para ello, se recomienda recoger información sobre el tipo de proceso, materiales utilizados y la forma en la que se presentan, tareas realizadas (frecuencia y duración), medidas técnicas de control aplicadas, etc. En caso de no ser posible, es necesario pasar a la siguiente etapa.

2) Evaluación de la exposición

El objetivo de esta evaluación es identificar si existe un aumento significativo de las concentraciones de nanopartículas en las proximidades de la fuente de emisión y/o en la zona de exposición respecto del fondo considerado.

En este sentido, se recomienda realizar medidas en tiempo real de forma simultánea en el campo cercano del trabajador y del foco de emisión de partículas, así como en un fondo interior alejado de la zona de exposición y de un fondo exterior (Figura 11), con el fin de poder distinguir la presencia de nanopartículas asociadas a otras fuentes externas. Para ello pueden utilizarse equipos como el CPC, DC, etc. Junto con estas medidas pueden realizarse análisis offline como SEM-EDX y TEM-EDX en el caso de registrarse elevadas concentraciones y no tener identificada la fuente de emisión.



Figura 11. Zonas de medición en torno a la fuente-receptor.

Además, durante la ejecución de las medidas experimentales, se recomienda llevar a cabo un completo registro de las operaciones realizadas, analizándose tanto las actividades que son objeto de estudio como aquellas que no lo son pero que pueden interferir en las medidas obtenidas. Este registro exhaustivo de las operaciones realizadas permite identificar las principales fuentes de emisión, así como evaluar si las distintas operaciones llevadas a cabo suponen un incremento significativo de las concentraciones de material particulado.

La presencia de nanopartículas en el lugar de trabajo será un indicador de la necesidad de adoptar medidas de control, o de valorar la eficacia de las medidas ya implementadas. En la Figura 12 se resumen los pasos necesarios para realizar una correcta evaluación de la exposición.

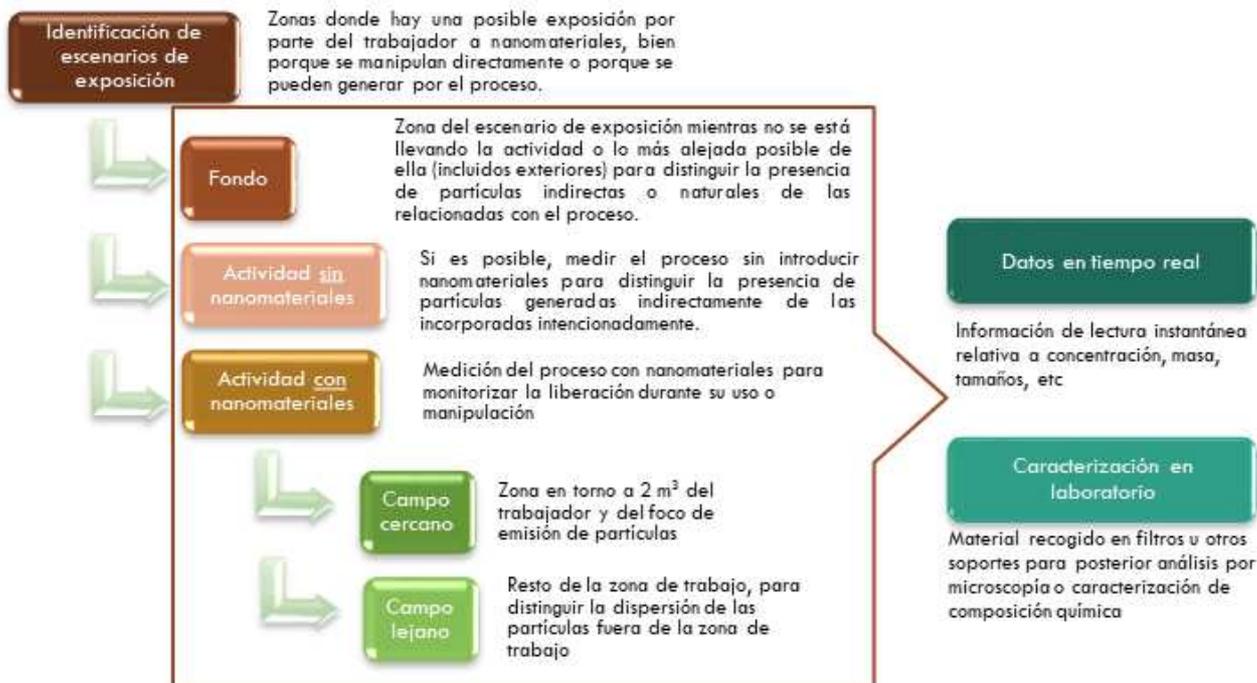


Figura 12. Pasos para la evaluación de la exposición

Ejemplos de casos de estudio

En la Tabla 8 y la Figura 13, se presentan los niveles de concentración en número y el tamaño de las nanopartículas emitidas para los diferentes escenarios de exposición evaluados, bajo condiciones reales de operación, en el marco del proyecto NanoIMPULSA.

Tabla 8: Escenarios de exposición evaluados en el proyecto NanoIMPULSA

Material	Operación realizada	Medidas técnicas	Concentración (#/cm ³)		Tamaño		Significativo
			Promedio	Mín. – Máx.	Promedio	Mín. – Máx.	
Au	Molturación	No	13791	2097 - 28480	n. d	n. d	Sí
Perovskitas	Síntesis	Si	4957	4252 - 5680	n. d	n. d	No
TiO₂	Manipulación y pesaje	No	142183	99780-236000	n. d	n. d	No
SiO₂		No	108634	78460-156500	n. d	n. d	No
Ag	Dosificación	No	15818	10426-25353	35	27-47	Sí
Ag		Si	30062	17207-48675	37	22-300	Sí
TiO₂		Si	26949	18860 - 43310	56	38-145	Sí
Feldespatos A	Ensacado	Si	40667	5645 - 379150	53	22-300	No
Feldespatos B		Si	34998	11245 - 269350	54	29-300	No
Cuarzo		Si	34052	13860 - 304117	37	23-191	No

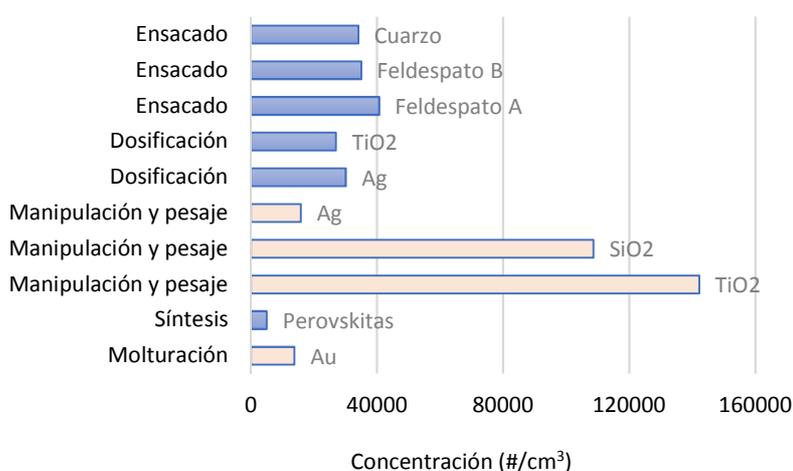


Figura 13. Gráfica de los datos de la Tabla 8. En naranja, los escenarios sin medidas técnicas de control.

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 8 y en la Figura 13, se pueden alcanzar las siguientes conclusiones:

- Los diferentes escenarios estudiados han permitido obtener una buena base de datos de concentraciones de nanopartículas asociadas a operaciones específicas realizadas a escala real en escenarios industriales.
- Entre las diferentes operaciones y nanomateriales estudiados se ha registrado un amplio rango de concentraciones (4957-142183 #/cm³). Esta variabilidad puede deberse a la

naturaleza y cantidad del nanomaterial manipulado, al tipo de operación realizada, a la implementación de medidas correctoras, etc.

- El estudio en detalle de los escenarios estudiados ha permitido identificar las operaciones de limpieza como una de las más problemáticas y, por tanto, se recomienda prestarles una mayor atención.
- Se ha considerado interesante evaluar la significancia del foco de emisión respecto a las concentraciones obtenidas en el punto de referencia interior. Esta comparación ha permitido identificar en determinados escenarios la presencia de fuentes de emisión externas, las cuales pueden llegar a contribuir significativamente sobre los niveles registrados.
- Respecto al comportamiento de los nanomateriales estudiados, se ha observado que la manipulación de algunos de ellos no conlleva la emisión de concentraciones elevadas de nanopartículas, debido probablemente a la tendencia a aglomerarse que presentan las partículas de este tamaño y/o a las pequeñas cantidades de material manipuladas.
- En relación con las medidas de control del riesgo implementadas en los escenarios estudiados, los sistemas de ventilación han resultado ser una de las medidas más extendidas.
- Las medidas realizadas han permitido verificar que los sistemas de ventilación son una buena herramienta para el control de la exposición frente a nanopartículas, siempre y cuando presenten un adecuado diseño. En este sentido, se recomienda analizar el proceso que se va a llevar a cabo teniendo en cuenta aspectos como, por ejemplo, las distintas operaciones que lo componen y las cantidades de material empleadas.



BUENAS PRÁCTICAS

PARA EL USO
SEGURO DE NANOMATERIALES



4. Buenas prácticas para el uso seguro de nanomateriales

4.1. Eficacia de las medidas comunes de gestión del riesgo frente a la exposición a nanomateriales

4.1.1. Conocimiento actual sobre la efectividad de los EPIs y MGRs frente a nanomateriales

Los conocimientos actuales sobre la eficacia de los equipos de protección personal y las medidas técnicas para los nanomateriales siguen siendo escasos. Sin embargo, están empezando a aparecer varias iniciativas, entre ellas proyectos de investigación financiados por la UE y estudios de organizaciones de investigación de toda la comunidad científica. Los proyectos financiados con fondos comunitarios [NanoMICEX](#) (FP7- 280713), [Scaffold](#) (FP7- 280535), [NanoREG](#) (FP7- 310584), [GUIDEnano](#) (FP7-604387) y [NanoRISK](#) (LIFE12 ENV/ES/000178) son las fuentes de información más relevantes sobre el desempeño de las MGRs frente a nanomateriales.

Hasta la fecha, la eficacia de estos sistemas de control no ha sido ampliamente estudiada para nanomateriales en entornos industriales. De la Tabla 9 a la Tabla 13 se resumen los estudios más relevantes publicados hasta ahora sobre las medidas de gestión de riesgo. En dos columnas se indica la eficiencia de referencia, testeada con los métodos tradicionales con partículas micrométricas, y en otra columna los resultados de eficiencias para tamaños submicrométricos o nanométricos de diferentes estudios.

Tabla 9. Estudios publicados sobre equipos de protección respiratoria

Tipo de respirador	Nanomaterial	Tamaño (nm)	Eficiencia de referencia (%)	Eficiencia Experimental (%)	Ref.
Respiradores para mascarillas con filtro de partículas aprobado por NIOSH (N95, N99, P100)	MWCNT		N95: 95 % N99: 99 % P100: 99.97 %	N95: > 98,21 % N99: > 99,76 % P100: > 99,994%	[92]
	NaCl Monodisperso	20-400 nm		N95: > 95,72 % P100: > 99,999%	[76]
		30- 1000 nm		N95: > 99 % P100: > 99,7%	[75]
	NaCl Polidisperso	41 nm		N95: > 95 %	[2]
		33 – 73 nm		N95: < 95 %	
		45-52 nm	84,7-97,3%	N95: 84 – 97 %	[26] [55]
	Monodisperso			N95: >95%	
	NaCl Polidisperso	10-200 nm		N95: > 99,88%	
	NaCl	7-289 nm	94,7-97,2 %	N95: > 95 %	[70]
	NaCl	10 – 400 nm		N95: > 99 % P100: > 99,98%	[92]
NaCl	20 – 900 nm		N95: > 95 %	[23]	

	NaCl	20 – 500 nm			
			R95: 95 % P95: 95 %	N95 < R95 P95 > 85 %	[77]
Respiradores de filtración de partículas de la UE (FFP1, FFP2, FFP3)	NaCl	93 – 1600 nm	78 % 92 % 98 %	FFP1: 94,90% FFP2: 96,31% FFP3: 96,25%	[43]

Tabla 10. Estudios publicados sobre ropa de protección

	Nanomaterial	Tamaño	Material / Tipo	Eficiencia Experimental (%)	Ref. nr.
Gas y partículas	NPs grafito	35–40 nm	Algodón de grosor 650 µm	70 %	[20]
			Polipropileno grosor 320 µm	88 %	
			Textil no tejido de polietileno de alta densidad y grosor 115 µm	96 %	
			algodón	73%	
	TiO2 Pt	TiO2: 9 - 90 nm Pt: 9 - 19 nm	Textil de polietileno de alta densidad	99,4%	[21]
			algodón	73%	
	Fe2O4 NaCl	30 - 500 nm	Celulosa (Paño de limpieza solvente)	87,2%	[19]
			Celulosa (Paño de limpieza)	92%	
			Celulosa (Paño de limpieza)	90,4%	
			Celulosa (Paño de limpieza para maquinaria)	85,3%	
			Polipropileno (bata de hospital)	83,3%	
			Polipropileno (traje de hospital)	79,6%	
			Polipropileno (mono sin capucha)	87,2%	
			Polipropileno (redcilla del pelo)	93,5%	
Polipropileno (redcilla del pelo)			96,5%		
Meta-aramida (Aislamiento de conjunto de bombero)			95,6%		
NaCl	100 - 500 nm	Tejidos y tejidos fibrosos	50 - 80%	[35]	
NaCl	14 – 400 nm	3 telas no tejidas (A, B, C) 2 tejidos (D, E)	A, B, C >99% D =91.5% E = 50%	[3]	
Polvos o soluciones coloidales	TiO2	35/65 tejido liso dealgodón/poliéster	Polvo de nTiO2 detectado después de 7 h de deformaciones mecánicas	[91]	
		Polietileno-polipropileno (PE-PP) no tejido			
	Colloidal AgNPs	10–150 nm	Bata de laboratorio de algodón Ropa de sala blanca de poliéster	[39]	

Tabla 11. Estudios publicados sobre guantes de protección

Nanomaterial	Tamaño	Material	Eficiencia Experimental (%)	Ref. nr.
Suspensiones de Nanopartículas de oro (nAu)	5 nm	Guantes de caucho de nitrilo (grosor ~ 100 µm)	70 %	[91]
	50 nm		88 %	
Nanoalumina Nanoarcillas		Guantes de látex sin polvo	Observación de superficie	[42]
		Guantes de examen médico de nitrilo sin polvo		

Tabla 12. Estudios publicados sobre medios de filtración respiratoria

Tipo	Nanomaterial	Tamaño (nm)	Eficiencia Experimental (%)	Ref nr.
Filtros fibrosos (HEPA, ULPA, FFP3) HEPA	Grafito	80 nm	>99% para todos los filtros	[21]
Filtro electrostático FF3	Pt	10 nm	max 99,8%	[22]
	TiO2		99,5% TiO2	
Medios filtrantes planos: Fibra de vidrio HD-2583 Electret	monodisperso	23, 30, 47, 86, 165,		[44]
		256, 307 nm		
	polydisperso	10-400 nm		
33 filtros respiratorios (9 filtros hidrófobos plisados y 24 electrostáticos)			99,3-99,998% Para los nueve filtros hidrófobos plisados 65-99,75% para los 24 filtros electrostáticos	[96]
12 filtros de sistema respiratorio (6 plisados y 6 electrostáticos)			77,4 – 99,996% (para 10 de los 12 filtros < 99,97%)	[97]
Pulverización de plasma	NaCl	0.03 and 10.0 µm	95.34 - 99.99%	[67]
Fibras minerales de zeolita	Partículas de cenizas volantes	4 - 10 nm	91.5 - 100%	[17]
Medio filtrante fibroso lavable por pulso Vidrio de borosilicato,	NaCl	< 150 nm	92.14 - 94.8 %	[95]
Filtro de Membrana HEPA Limpiadores de aire portátiles con filtro de electreto (EE) y medio de alta eficiencia (HE)	Velas de cera pura que emiten carbono elemental negro fino	10 nm – 10 µm	88.6%	[50]
Mezcla de éster de celulosa (MCE), Policarbonato, politetrafluoroetileno (PTFE), cloruro de	NaCl	10 – 400 nm	MCE, PTFE y PVC > 92%, Policarbonato 40,23 - 99,61% Membrana de plata 38,58 - 99,99%	[83]

polivinilo (PVC) y membrana de plata			
Filtro de membrana de acetato de celulosa y filtro de fibra de vidrio	Fullerenos y CuO	CMD = 142 – 154 nm	Filtro Revestido con surfactante catiónico = 70%, Filtros aniónicos revestidos con tensioactivo = 0%. [38]

Tabla 13. Estudios publicados sobre sistemas locales de ventilación extractiva

TIPO	NMs	TAMAÑO (nm)	EFICACIA	Ref.
VTRINAS/CABINAS	CNTs y/o grafeno	5.6 -30000	82.6% reducción en zona exposición trabajador	[30]
	Al ₂ O ₃	200	En Cabina flujo constante: Bajo rendimiento	[88]
			En Cabina con velocidad de captura constante: Buen rendimiento	
			En Cabina con cortina descendiente de aire: Buen rendimiento	
	Tetraisopropóxido de titanio (TTIP)	D ₅₀ =31	>95%	[79]
	Nanoalúmina	5-20000	>99.9%	[87]
	Nanoarcilla		>99.9%	
	MWCNTs (Multiwall carbon nanotubes)	10-50 nm diámetro externo y 1-20 µm longitud	>99.9%	[7]
	CNTs	10-30	93-96%	[48]
CNTs	n.d.	36% reducción de la concentración en zona exposición trabajador, 40% reducción fuera de la cabina.	[49]	
CAPTADORES	Ag	300	>99%	[62]
	Mn	300	>99%	
	Co	300	>99%	
	MWCNTs (Multiwall carbon nanotubes)	10-50 nm diámetro externo y 1-20 µm longitud	<15%	[8]
	Óxidos nanometálicos (Ag, Cu, Co, Ni, Fe, Mn)	300-1000	92% reducción en emisión y 100% de reducción en concentración nanopartículas	[51]
RECEPTORES	Nanoalúmina	5-20000	>99.9%	[87]
	Nanoarcilla		>99.9%	
	CNTs	10-110	Aumento del 15-20% concentración en zona expos. trabajador	[49]

Los datos publicados hasta la fecha sugieren un buen rendimiento frente a nanomateriales para equipos de protección respiratoria, donde la mayoría de los datos obtenidos de publicaciones

revisadas por pares mostraron eficiencias por encima de los niveles de umbral definidos en las normas armonizadas de referencia.

En el caso de la ropa de protección y los guantes de protección química, todavía hay muchas incógnitas sobre si las medidas de protección tradicionales proporcionan o no un nivel adecuado de protección contra los nanomateriales. La información obtenida de la literatura pone de relieve dos grandes desafíos vinculados con la protección corporal. La primera es entender los parámetros externos que pueden influir en la penetración de nanopartículas a través de tejidos comúnmente emitidos. El segundo es considerar las variaciones en las propiedades superficiales de los materiales utilizados guantes de protección y ropa de protección, lo que resulta en altas variaciones en los resultados de rendimiento.

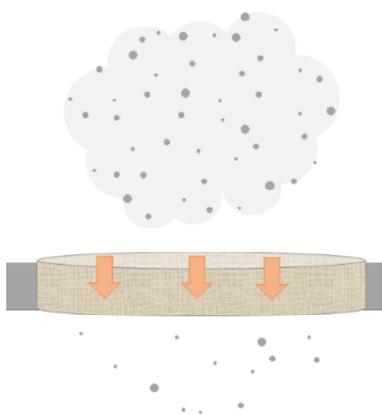
4.1.2. Metodología de ensayos desarrollada dentro del proyecto

Los métodos actuales de prueba de la eficiencia de las medidas de gestión de riesgo están desarrollados para productos químicos y partículas de tamaños micrométricos y no necesariamente incluyen propiedades nanoespecíficas. La aplicabilidad de los criterios de clasificación necesita ser evaluada para certificar la seguridad del trabajo con nanomateriales.

En el caso de los EPIs, dado que las pruebas se centrarán únicamente en la evaluación de la efectividad de los EPI contra la penetración de nanopartículas en el aire, no se realizarán otras pruebas de resistencia química, térmica, biológica o mecánica. Por esta misma razón, algunos de los EPIs tampoco se pueden testear, ya que son abiertos y no se justan al cuerpo (batas de laboratorio, escudos faciales, gafas de montura universal).

En general, es importante no evaluar la efectividad de las medidas de gestión de riesgo únicamente en función del tamaño de partícula más pequeño, especialmente en el caso de los controles de ingeniería, donde las nanopartículas se aglomerarán y se agregarán a fracciones de mayor tamaño que aún podrían ser dimensiones importantes que considerar en cuanto a la exposición y los efectos de salud relacionados.

Para evaluar la efectividad de un EPI, la metodología requiere medir la penetración de las partículas de un rango dado a través de las diferentes partes del equipo. Por ejemplo, en el caso de las máscaras, se estudia por separado la penetración a través del filtro y el ajuste de la máscara (Fuga interna, IL). También se verifica el rendimiento del conjunto, conocido como fuga interna total (TIL). En algunos casos, se debe suministrar una línea de aire limpio dentro del EPI para evitar una presión insuficiente debido a la succión de los equipos de medida que cause resultados falsos (ecuación 1).



$$IL = \frac{C_{in}}{C_{out}} \cdot \left(\frac{t_{in} + t_{ex}}{t_{in}} \right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde C_{in} y C_{out} son la concentración de nanomaterial dentro y fuera del EPI respectivamente, y en el caso de los respiradores, debido a la retención de los pulmones, t_{in} y t_{ex} son la duración total de inhalación y exhalación, respectivamente, aunque cuando el muestreo se toma de forma continua, este factor puede asumirse como un valor empírico de 1,25 (para un caudal

de 120 lpm y una frecuencia respiratoria de 40 lpm). La eficiencia del EPI es el complemento de la IL, es decir:

$$Eff (\%) = 100 - IL \quad \text{Ecuación 2}$$

El método de ensayo para la medición de la penetración de nanomateriales en los EPIs está basado en la normativa existente, pero adaptando equipos y técnicas a la medición de nanomateriales. Sin embargo, dependiendo del nanomaterial probado, puede realizarse en sujetos humanos (con nanopartículas de NaCl de diámetro geométrico medio 35 nm) o en partes sustitutivas, como cabezas de Sheffield o maniquíes. Las pruebas con sujetos de ensayo tienen la ventaja de que proporcionan resultados más cercanos a la realidad, ya que se consiguen diferentes morfologías faciales y corporales, movimientos, gesticulación y hechos que pueden afectar el rendimiento del EPI como sudor o desgaste.

Los ensayos están basados en la normativa estándar para evaluar la efectividad del equipo de protección común contra material particulado en el aire UNE-EN 140:1999/AC:2000 y EN 13274-1: 2001 para máscaras, UNE-EN 1827:1999+A1:2010 para los filtros respiratorios, guantes (UNE-EN 374-3:2004) y ropa protectora (UNE-EN ISO 13982-1:2005).

En el caso de la ventilación y otros sistemas de control técnico, el criterio para evaluar la eficiencia es análogo, dispersando una concentración de nanomateriales conocida y controlada frente al método de gestión en particular y evaluando la penetración a través de él en un método lo más sellado posible. De esta forma, se evalúa la penetración, la eficiencia, y el tiempo de respuesta de la medida en concreto. Por supuesto, el escalado a nivel industrial siempre es un factor crítico que no siempre puede evaluarse a nivel laboratorio o piloto.

4.2. Factores de protección y niveles de eficacia basados en los estudios realizados

4.2.1. Protección respiratoria

Se ha probado la eficacia frente a nanomateriales de los equipos respiratorios más representativos en uso a partir de una encuesta realizada durante el proyecto, siendo estos las medias máscaras y máscaras completas reusables con filtro P3 (máxima protección) y P2. También se han probado las mascarillas de un solo uso a distintos niveles de filtración (FFP1, FFP2 y FFP3), así como los filtros por sí solos para evaluar si la pérdida de eficiencia se debe al filtro o al ajuste de la máscara. En el caso de las máscaras reusables, se ha comparado también una máscara envejecida según norma UNE-EN 140 frente a una nueva para ver si la eficacia se degradaba con el tiempo.

La Tabla 14 resume los resultados obtenidos de las actividades experimentales realizadas con sujetos de ensayo. Los resultados mostrados son la media de los ejercicios realizados.

Tabla 14. Eficiencias de diferentes tipos de máscaras y filtros de partículas probados para nanomateriales de NaCl en sujetos de ensayo

EPI	Especificaciones	Eficiencia estándar	Eficiencia (nanomateriales)	NM ensayado
Filtros	P2	94 %	99,83 %	NaCl
	P3	99,95 %	99,97 %	
Media máscara 	Nueva con filtro P3	99,95%	99,47 %	NaCl
	Envejecida con filtro P3	99,95%	99,77 %	
Máscara Completa 	Nueva con filtro P3	99,95%	99,73 %	NaCl
	Envejecida con filtro P3	99,95%	99,78 %	
Desechable 	FFP1	80%	75,63 %	NaCl
	FFP2	94%	88,09 %	
	FFP3	99%	93,59 %	

Los resultados se muestran en verde cuando la eficacia obtenida para nanomateriales es mayor que la dada por la norma, en amarillo cuando es ligeramente menor, pero está dentro del error experimental (menor de un 5%) y en rojo cuando hay una degradación evidente de la eficacia de la máscara para nanomateriales.

Se puede observar que, así como los filtros por sí solos proporcionan un nivel de eficiencia incluso superior al estándar, sobre todo en el caso de los P2, las mascarillas desechables presentan una degradación de eficacia importante, siendo las FFP1 Y FFP2 totalmente no recomendables para el trabajo con nanomateriales.

Esto lleva a pensar que es el ajuste, y no la capacidad de filtración, la que promueve la penetración de nanomateriales al interior. Por ello, en la Tabla 15 se han realizado ensayos con SiO₂ en forma de nanomaterial (diámetro de partícula < 50 nm) usando una cabeza de ensayo tipo Sheffield.

Los resultados muestran que la eficiencia es incluso mayor que la estándar y la obtenida con sujetos de ensayo, lo que corrobora que es la fuga de sello facial y no la penetración del filtro es un parámetro clave a considerar cuando se trabaja con nanomateriales.

Tabla 15. Eficiencias de diferentes máscaras y filtros probados para NPs de SiO₂ en maniqués

EPI	Especificaciones	Eficiencia estándar	Eficiencia (nanomateriales)	NM ensayado
Media máscara	P2	94 %	96,26 %	SiO ₂
	P3	99,95 %	99,99 %	
Máscara Completa	P2	94 %	99,98 %	SiO ₂
	P3	99,95 %	99,55 %	

4.2.2. Protección dérmica

En el caso de la ropa de protección, en cuanto a la protección respiratoria, se pueden realizar ensayos de resistencia a la penetración de nanomateriales con sujetos humanos cuando el material en aerosol es NaCl, para examinar los trajes en movimiento o con un maniquí con cualquier otro material. En el caso de los trajes, se mide en tres alturas diferentes, pecho, cintura y rodilla, y se realiza el cómputo global de la eficacia. Los resultados de la evaluación de la eficacia de trajes de protección química y los guantes de protección se presentan en las Tabla 16 y Tabla 17 respectivamente.

Tabla 16. Eficacia de los trajes protectores frente a nanomateriales

EPI	Especificaciones	Eficiencia estándar	Eficiencia (nanomateriales)	NM ensayado
Mono de protección (PE) tipos: 4,5,6 	Pecho	> 85 %	> 96 %	NaCl
	Espalda	> 85 %	> 88 %	
	Rodilla	> 85 %	> 92 %	
	Global	99,8 %	94,25 %	
Mono de protección (PE) tipos: 3,4,5,6 	Pecho	> 85 %	> 94 %	NaCl
	Espalda	> 85 %	> 88 %	
	Rodilla	> 85 %	> 97 %	
	Global	99,8 %	93,38 %	

Aunque la eficacia por partes es igual o superior a la estándar, el cómputo global arroja resultados inferiores debido a que los trajes no van sellados y cualquier pequeña abertura, unido a las corrientes de las bolsas de aire dentro del traje producidas por los movimientos del portador propician la penetración de nanomateriales a su interior.

Tabla 17. Eficacia de los guantes protectores químicos frente a nanomateriales

EPI	Especificaciones	Eficiencia (nanomateriales)	NM ensayado
Desechables 	Nitrilo fino	99,96	NaCl
	Nitrilo grueso	99,994	
	Vinilo	99,897	
	Vinilo sin polvo	99,987	
	Látex sin polvo	95,36	
Reusables 	Neopreno / Natural Látex	98,37	NaCl
	PVC	96,83	

El rendimiento de los guantes depende fuertemente del material del guante, y aunque generalmente no hay poros en su superficie, algunos pequeños defectos o huecos pueden ser suficientes para ofrecer una manera de penetrar el guante.

4.2.3. Protección ocular

En el caso de protección ocular, sólo se probaron gafas de seguridad puesto que se consideran la única protección ocular que ofrece una disposición cerrada y combinable con respiradores. Las gafas probadas eran bien de montura universal, o el tipo buzo, que constan de pequeños agujeros en los lados para permitir la ventilación. Los resultados de la evaluación de la eficacia se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Eficacia de las gafas de seguridad frente a nanomateriales

EPI	Eficiencia (nanomateriales)	NM ensayado
Montura universal 	57,79 %	NaCl
Tipo buzo 	20,07 %	NaCl

En cualquier caso, resulta obvio que ninguno de los dos equipos va sellado por lo que la penetración de nanomateriales es esperable. En cualquier caso, si la exposición a nanomateriales va a ser elevada, se recomienda usar una máscara completa.

4.2.4. Ventilación

Se probó una campana de laboratorio, que es el método preferido por los usuarios encuestados (43% según ICON [78]). El método de ensayo se muestra en la Figura 14. Se establecieron 5 puntos a lo largo del plano de la campana, desde cerrado al máximo (P1) hasta abertura máxima (P5), y se midió la concentración de una dispersión estable de nanomateriales en el interior de la campana frente a lo que se recogería justo en la zona exterior y en la zona del trabajador de un maniquí en dos posiciones frente a la campana, sentado y de pie.



Figura 14. Dispositivo experimental para evaluar la eficacia de campanas de laboratorio frente a nanomateriales.

Los resultados de la fuga de nanomateriales del interior de la campana a la zona de respiración del trabajador en dos posiciones se pueden ver en la Figura 15. Se puede observar como la eficiencia extractiva decrece a medida que la abertura de la campana es mayor, aunque parece que la posición del trabajador perturba el porcentaje de material liberado hacia el exterior.

Con maniquí

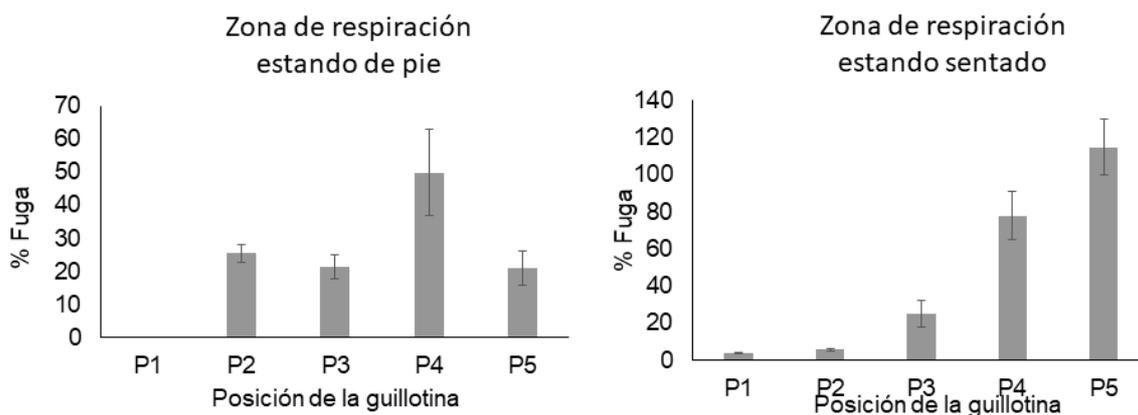


Figura 15. Porcentaje de fuga de nanomateriales hacia la zona de respiración del trabajador en las diferentes posiciones del plano de la campana.

Para comprobar la influencia del obstáculo que supone un trabajador en la campana para el material liberado, se midió en esas mismas dos zonas sin el maniquí. Los resultados de la Figura 16 muestran un comportamiento contrario a la Figura 15, por lo que se puede deducir que no existen tendencias relacionadas con la exposición de pie o sentado.

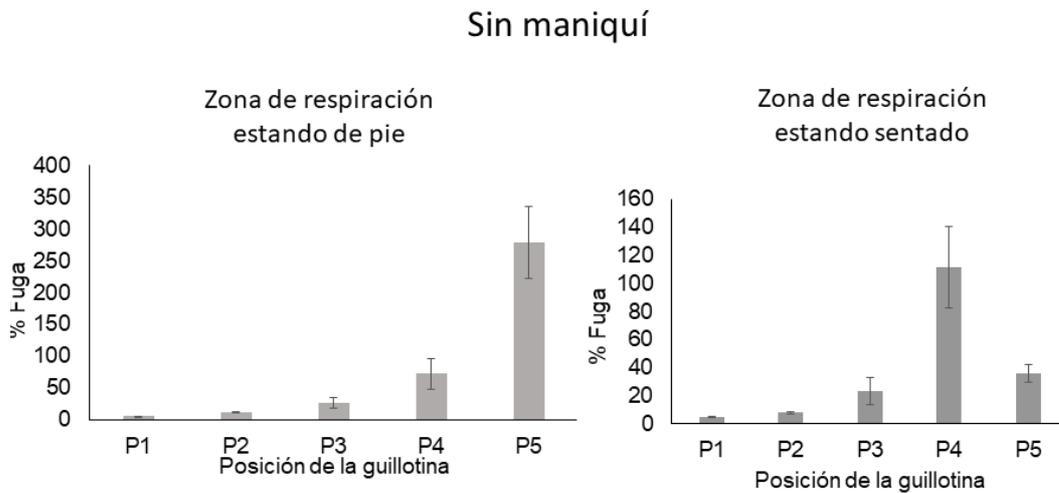


Figura 16. Porcentaje de fuga de nanomateriales hacia el exterior en las diferentes posiciones del plano de la campana.

4.3. Tecnologías depuración de emisiones de material particulado.

Cuando se incorporan medidas técnicas de control, como los sistemas de extracción localizada, es necesario instalar sistemas de depuración para minimizar las emisiones de nanopartículas a la atmósfera. Entre los diferentes sistemas de depuración existentes para material particulado, en la Tabla 19 se presentan aquellos que han sido testeados para la retención de nanopartículas.

Tabla 19: Métodos para la separación de partículas en aplicaciones industriales (Peukert et al., 2001)

TECNOLOGÍAS DE DEPURACIÓN	CASOS DE ESTUDIO				
	TIPO DE PARTÍCULAS	TAMAÑO DE PARTÍCULA EMITIDO	ADECUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA	EFICACIA	
Ciclones	Las partículas se someten a una fuerza centrífuga para separarlas de la corriente gaseosa. Pueden cubrir el rango de 1-1000 μ m en el tratamiento de emisiones.	Combustión motor diésel	10-30nm	Ciclón equipado con un electrodo central que aplica un alto voltaje entre el electrodo y la pared del ciclón.	Entre 50% al 80%, dependiendo de la velocidad de flujo y el voltaje aplicado.
Precipitadores electrostáticos (ESP)	Consiste en la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico muy elevado entre dos electrodos, ionizando el gas a depurar. Las partículas cargadas se depositan sobre el electrodo colector para su posterior eliminación.	Cuarzo	8 μ m	ESP tubular húmedo, con la característica especial de tener un electrodo de recolección continuamente irrigado por medio de una película líquida. El parámetro de diseño decisivo para las EPS es el área de recolección específica (SCA: Specific Collection Area).	Con un valor de SCA (área de recolección específica) de 58s/m, se observa una colección casi completa incluso para partículas por debajo de 1 μ m.
Filtros de mangas	Separación de partículas de un fluido mediante el paso de este a través de un lecho poroso permeable que las retiene. Método más antiguo, simple y eficaz para la separación sólido-gas.	TiO ₂	< 1 μ m	n.a.	99% partículas <1 μ m

Para que el diseño de un sistema de depuración resulte apropiado y se obtengan óptimos valores de eficacia, es recomendable realizar un cuidadoso estudio de las propiedades de las partículas a tratar (tamaño de partícula, forma, fluidez, propiedades de adhesión o reactividad) y de las características de la corriente de gas (temperatura, humedad y composición del gas). Hasta la fecha, la eficacia de estos sistemas de control no ha sido ampliamente estudiada para nanomateriales en entornos industriales. En la Tabla 20 se recopilan los estudios más interesantes consultados sobre la materia.

Tabla 20: Eficacia de sistemas de depuración de emisiones para nanopartículas.

Método Depuración		Material Ensayado	Tamaño de Partícula (nm)	Eficiencia Experimental ⁽¹⁾ (%)	Ref.
FILTROS	Filtro de fibra de vidrio	NaCl	< 100	60-98	[40]
	Filtro de poliéster	NaCl	8.5-94.8	35-98	[84]
	Filtro de celulosa (HEPA)	NaCl	8.5-94.8	99-100	[85]
	Filtros de fibra de vidrio y de nanofibras	Ag	3-20	70-99.99	[41]
	Malla de acero inoxidable	Ag	3-20	15-90	[82]
	Filtro de fibra de vidrio	MWCNTs	100-300	40-90	[81]
	Filtro con membrana PTFE	NaCl	10-300	98.8-100	[46]
	Filtros de fibra de vidrio	NaCl	2.5-50	20-99	[4]
		NaCl	50-500		
		C	d ₅₀ =7		
Filtro PTFE	Cu	6-16	99-100	[16]	
Filtro poliamida					
REACTOR LECHO FLUIDIZADO	Lecho de arena de silicio	SiO ₂	80	75	[47]
		Al ₂ O ₃	80	75	
	Lecho de carbón activo	SiO ₂	80	16-57	
		Al ₂ O ₃	80	69-80	
CICLÓN	Filtro de fibra de vidrio	NaCl	12-100	50-98	[9]

(1) Rangos de eficacias en función de las variables estudiadas (velocidad del gas, temperatura, presión, tiempo de operación)

El método de filtración es considerado el método más sencillo y común en el de control de partículas y de depuración de aire. A la hora de realizar una adecuada selección del medio filtrante es necesario conocer las características de la corriente de aire a tratar (temperatura, humedad, composición del gas) y las características fisicoquímicas de las partículas [52].

Bajo el marco del proyecto NanoIMPULSA, se han desarrollado estudios experimentales con el objetivo de evaluar la eficacia de diferentes telas de filtración, ampliamente utilizadas para la depuración de partículas en el rango micro a nivel industrial. Se han seleccionado distintos medios filtrantes con diferentes acabados superficiales tal y como muestra la Tabla 21:

Tabla 21: Características medios filtrantes estudiados.

TELA FILTRANTE	1	2	3	4	5
Tipo de tejido	Arammídica	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Acrílico
Tratamiento antiestático				✓	
Aplicación membrana Teflón			✓	✓	
Luz de malla	n.d.	20-25µm	±2µm	±2µm	20-25µm
Tª máxima de trabajo	200-220°C	150°C	150°C	150°C	130-140°C

Las diferentes telas filtrantes se sometieron a diversos ensayos, variando el tamaño medio de las nanopartículas a filtrar (entre 30 a 80 nm), concretamente se estudiaron nanopartículas de NaCl, y se experimentaron distintas velocidades de la corriente gaseosa a tratar (0.21, 0.63, 1.05 y 2.7m/s).

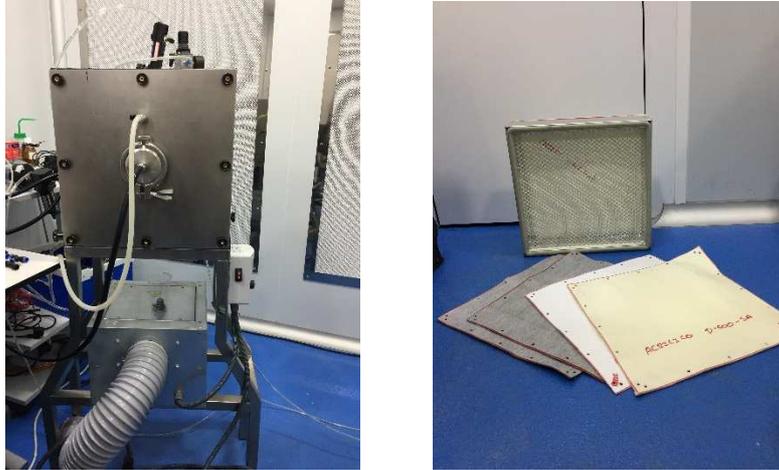


Figura 17 : Dispositivo experimental y telas estudiadas para la evolución de la eficacia de filtración frente a NMs

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las distintas etapas de estudio llevadas a cabo:

- **Etapas 1: Estudio de la eficacia de los medios filtrantes**

En esta primera fase del estudio, se ha evaluado la eficacia de filtración de los medios filtrantes seleccionados frente a nanopartículas de un tamaño medio determinado (40 nm), variando la velocidad de entrada del gas (0,63 y 1,05 m/s). Los ensayos se han realizado a temperatura ambiente (25°C).

Con el objetivo de verificar la metodología experimental desarrollada, también se analizaron los valores de eficacia frente a nanopartículas de un filtro HEPA (filtro de aire de alta eficacia), manteniendo las mismas condiciones de ensayo aplicadas al resto de telas filtrantes estudiadas, dado que este tipo de filtros han sido ampliamente estudiados para la depuración de nanopartículas.

La Figura 18 muestra los valores de eficacia obtenidos para cada una de las telas en función de las velocidades del gas estudiadas:

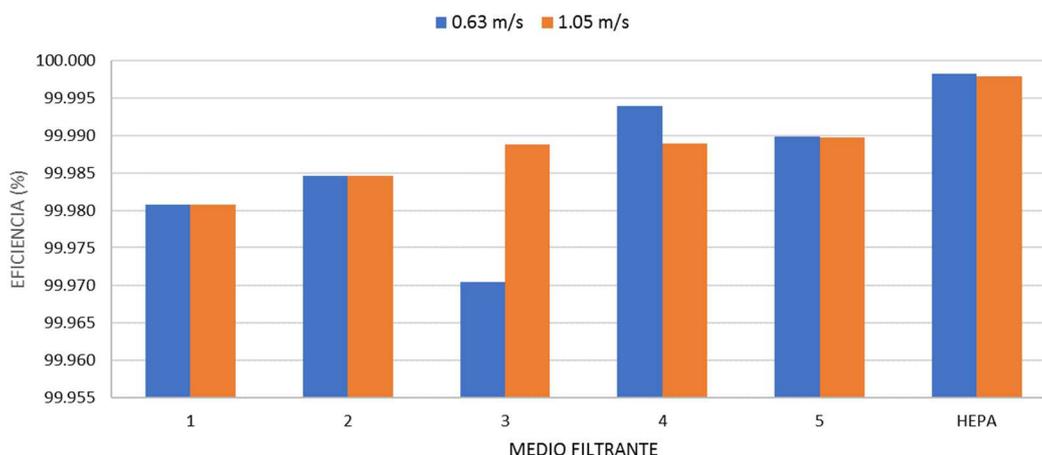


Figura 18 : Eficacias de las telas filtrantes seleccionadas frente a nanopartículas de 40nm

Los resultados obtenidos para las dos velocidades estudiadas muestran eficacias elevadas, por encima del 99,97% en todos los casos, siendo los valores obtenidos para los filtros HEPA los más elevados, tal y como cabía esperar. Concretamente, en el caso de los filtros HEPA se ha obtenido una eficacia de 99,998% y 99,997% para las velocidades de 0,63 m/s y 1,05m/s respectivamente. Estos valores son muy similares a los obtenidos en estudios previos para velocidades del gas más bajas, concretamente se alcanzaron eficacias del 99,999% [85].

- **Etapas 2: Variación del tamaño de nanopartículas y de la velocidad del gas**

La segunda etapa de la investigación tuvo como objetivo, por un lado, estudiar la influencia del tamaño de nanopartículas a filtrar, y por otro, estudiar la influencia de la velocidad del gas a tratar para un mismo medio filtrante.

Se seleccionó la tela de poliéster con un tratamiento superficial de PTFE (Tela 3) por tratarse de la fibra que presentó una mayor variación de la eficacia al modificar la velocidad de entrada del gas. En la Figura 19 se representan gráficamente los resultados obtenidos:

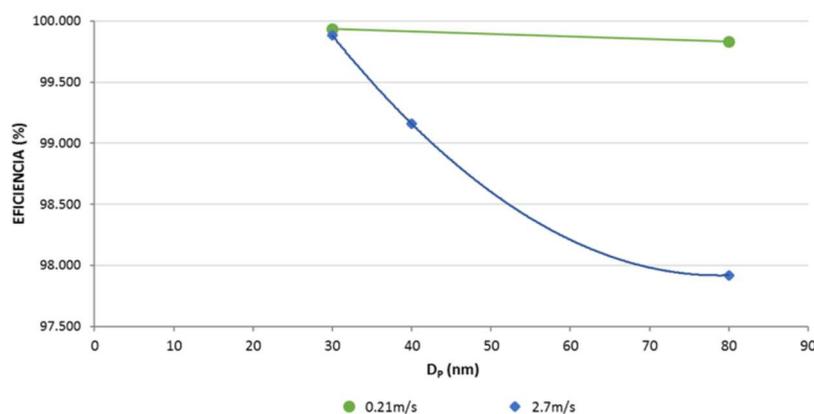


Figura 19 : Evaluación de la eficacia de un medio filtrante en función del tamaño de partícula y de la velocidad del gas.

Según la bibliografía consultada, en el caso del estudio de la eficacia de una fibra de poliéster, a medida que aumenta el tamaño de las partículas la eficacia de filtración disminuye, lo que indica el predominio del mecanismo de difusión como medio de transporte en el rango estudiado (8.5-

94.8 nm). Asimismo, se ha observado el mismo comportamiento cuando se modifica la velocidad del gas, para velocidades más elevadas la eficacia de filtración disminuye para un mismo medio filtrante [84].

Si se analiza la Figura 18, se observa un comportamiento similar para la fibra de poliéster con un tratamiento superficial de PTFE estudiada. Concretamente, se observa una ligera disminución de la eficacia cuando aumenta el tamaño de partícula para una velocidad de 0.21 m/s, mientras que en el caso de la velocidad de 2.7m/s se muestra una disminución más pronunciada.

El menor valor de eficacia obtenido, 97.9%, se corresponde con el tamaño de partícula mayor (80nm) y con la velocidad de gas más elevada (2.7m/s), estando estos resultados en concordancia con las conclusiones extraídas de la bibliografía consultada.

A pesar de las dificultades encontradas en el desarrollo experimental, el estudio de la eficacia de filtración frente a nanopartículas utilizando diferentes medios filtrantes ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Todos los medios filtrantes analizados han mostrado valores de eficacia muy elevados por encima del 98%.
- Se ha podido evidenciar la influencia del tamaño de partícula y de la velocidad de la corriente de gas a depurar, disminuyendo la eficacia del medio filtrante a medida que dichas variables aumentan su valor.

No obstante, con el fin de asegurar la robustez de los resultados obtenidos se considera necesario diseñar una nueva caja metálica que asegure una estanqueidad óptima.

Una nueva línea de investigación que se abre con el trabajo realizado sería desarrollar una planta piloto en la cual poder probar las telas seleccionadas en filtros de mangas para evaluar las eficacias a escala industrial.

4.4. Criterios de decisión para la selección de estrategias de control de la exposición frente a nanomateriales

Después del estudio en profundidad de la casuística y la eficacia de las medidas de gestión de riesgo contra los nanomateriales, se puede ofrecer una cadena de apoyo a la decisión más apropiada.

De acuerdo con jerarquía de controles mostrada en la *Figura 5*, se recomienda seguir la cadena de controles para evitar el riesgo, comenzando por: 1) sustitución, 2) medidas técnicas, 3) medidas organizativas, y 4) uso de EPIs.



En el caso de la **sustitución**, es altamente recomendable seleccionar nanomateriales solubles, con un potencial de polvo muy bajo y no clasificados como peligrosos. Cuando no sea posible la sustitución por nanomateriales potencialmente menos peligrosos, algunas medidas de reducción del riesgo basadas en principios de sustitución son:

- Reducir al máximo la cantidad de nanomateriales;
- Materiales o productos listos para usar para evitar una preparación adicional antes de su uso en el lugar de trabajo. Preferiblemente, NM en una matriz, es decir, dispersión, suspensión, pasta, paletizada o encapsulada;
- Métodos de trabajo que generen el menor número de aerosoles posible (métodos de procesamiento de bajo polvo o baja energía): es decir, cortar en lugar de aserrar y cepillar / laminar en lugar de rociar.



Las medidas técnicas son probablemente la estrategia de control más efectiva y aplicable para la mayoría de los procesos que involucran nanomateriales.

La ventilación extractiva es la medida técnica más común utilizada para controlar las exposiciones ocupacionales a los contaminantes del aire, incluyendo nanomateriales. El uso de ventilación general se limita a fuentes de baja toxicidad que generalmente se difunden por todo el lugar de trabajo y donde los trabajadores están a una distancia suficiente de la fuente. En el caso de trabajar con un material de valor límite o toxicidad indeterminada, como son los nanomateriales, es preferible el uso de sistemas locales de ventilación extractiva (*LEVs*, de sus siglas en inglés) a la ventilación general.

Los datos obtenidos de la literatura y los estudios realizados en el marco del proyecto revelaron:

- La "dilución" de ventilación general puede utilizarse para exposiciones no peligrosas, pero no es aceptable para nanomateriales.
- Los sistemas de ventilación localizada extractiva son un método primario para controlar las exposiciones ocupacionales a nanomateriales, siendo los más frecuentemente utilizados frente a nanomateriales el encerramiento (campanas de laboratorio, cajas de guantes, etc.) y las campanas extractivas, móviles, fijas o situadas en el equipo.
- Debe llevarse a cabo un mantenimiento adecuado de las medidas técnicas, incluyendo controles adicionales del sistema para asegurar un rendimiento adecuado del sistema.



Como se indicó anteriormente, las medidas de protección organizacional consisten en varias políticas y requisitos que se establecen a nivel administrativo para promover la seguridad en una instalación donde se trabaje de forma directa o indirecta con nanomateriales, e incluyen acciones como:

- Restringir el acceso a áreas en las que se usan nanomateriales de riesgo indeterminado;
- Requerir la aprobación previa y medidas adicionales de control para ciertas operaciones o actividades particularmente peligrosas;
- Publicar letreros apropiados para identificar peligros específicos dentro de un área;
- Entrenamiento en rutinas de trabajo de buenas prácticas;
- Instrucción en el correcto uso y mantenimiento de los EPIs;
- Preparación de instrucciones de trabajo e instrucciones sobre cómo manejar las rutinas diarias de trabajo, derrames, accidentes, limpieza, higiene personal, incendio, inactividad, mantenimiento, etc.



En cualquier caso, el **EPI** es el último recurso al que debe acudir cuando todas las medidas anteriores no han resultado completamente efectivas.

En cuanto al parámetro más importante para la protección contra nanomateriales, además de la adecuación del EPI para las funciones a desarrollar, es el **ajuste del equipo de protección** a las características del usuario, ya que la ruta más probable para la entrada de nanomateriales son las brechas entre el equipo y la piel del usuario.

Antes de seleccionar el equipo de protección se debería comprobar su adaptación al usuario, por lo que es recomendable que se realicen pruebas de ajuste para determinar el modelo y la talla que mejor se adapta a la morfología del usuario. Además, el usuario deberá haber recibido la formación e información necesaria para saber cómo colocarse y utilizar correctamente el equipo y para poder detectar cualquier desajuste.



En los **equipos de protección respiratoria** que se utilicen frente a nanomateriales se recomienda, de forma general, el uso de equipos **filtrantes de partículas de clase 3**, bien filtros P3 acoplados a máscara completa o a mascarilla (media máscara) o bien mascarilla autofiltrante FFP3.

Asimismo, con objeto de reducir al máximo posible la fuga hacia el interior, sería aconsejable el uso de máscaras completas que ofrecen una mayor hermeticidad, además de proporcionar cierta protección ocular. Por la misma razón, debe prestarse especial atención a aquellos equipos en los que no se pueda conseguir una buena hermeticidad, como ocurre con algunas mascarillas autofiltrantes.

En el caso de la selección del respirador, se debe realizar un estudio más detallado para analizar el nivel de aislamiento o protección del filtro. En la Figura 20, se muestra un diagrama de flujo más detallado para la selección de respiradores.

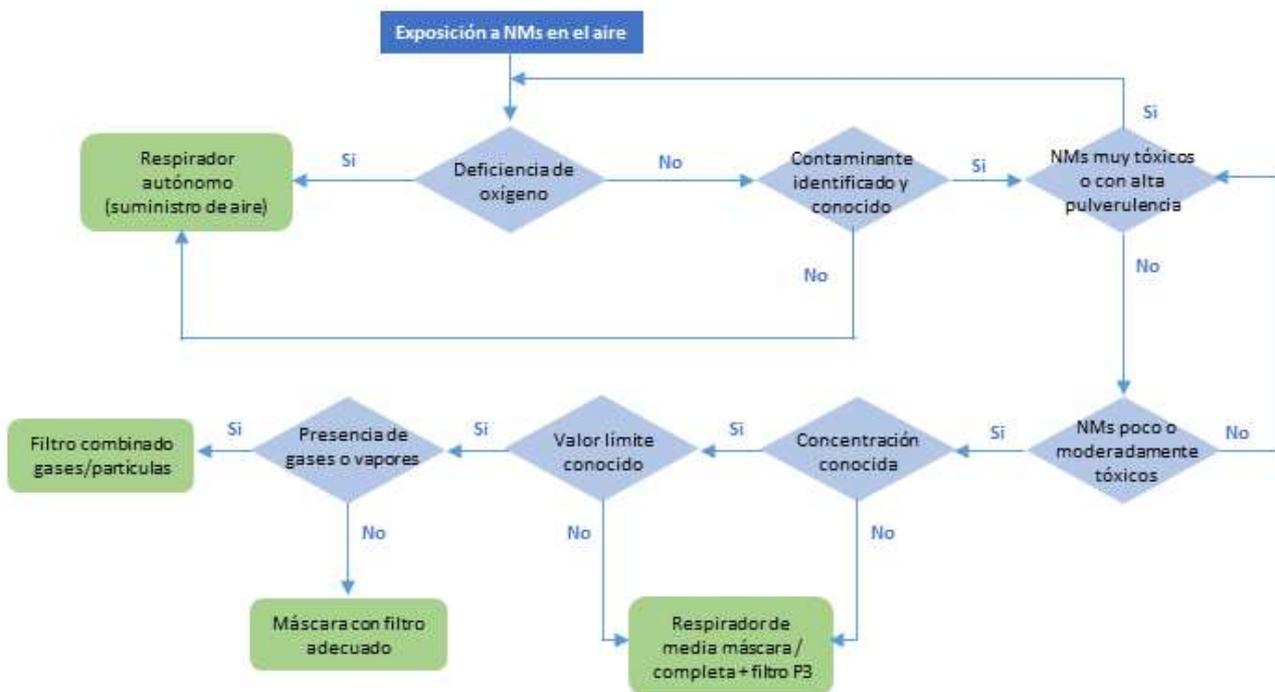


Figura 20. Árbol de decisión para la selección de respiradores.



Para la **ropa de protección química**, el material de fabricación y el diseño del vestuario juegan un papel clave en el nivel de protección alcanzado. La estanqueidad del equipo asegurará la resistencia a la penetración de productos químicos en cualquier forma (polvos, líquidos y gases) a través de costuras y uniones.

- De esta manera, los **materiales "no tejidos"** parecen ser mucho más efectivos en la retención de nanomateriales que los tejidos convencionales como es el caso del algodón o de las mezclas de algodón-poliéster [59].
- Si el nanomaterial se encuentra en forma de polvo, se recomienda, en función de la exposición esperable, 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.
- Cuando la exposición se limita sólo a una parte del cuerpo, por ejemplo, el torso, podrían usarse prendas de protección parcial desechables, como ropa Tipo 5 [PB] incluyendo prendas como las batas.



El nivel de **protección del guante** contra un químico depende principalmente de los químicos específicos manejados, en base a la resistencia del material a la penetración del producto (solventes o mezclas) a través del material del guante en términos de tiempo de penetración o tiempo de penetración.

- Se recomienda seleccionar guantes de protección contra productos químicos y microorganismos, de elastómeros como nitrilo, látex o butilo.
- En el caso de que se utilicen guantes desechables, normalmente muy finos, se recomienda la utilización de **dos pares de guantes superpuestos**, ya que suelen tener muy poca resistencia mecánica.
- Si en conjunto con los nanomateriales se manipulan otros compuestos químicos, como disolventes, también habrá que seleccionar un guante con una protección química específica.



La **protección ocular** a utilizar depende de la tarea que se lleve a cabo y de la forma de presentación de los nanomateriales.

- Cuando se manipulen sólidos y o se lleven a cabo operaciones que generen polvo, se recomienda el uso de gafas de montura universal para evitar el riesgo de contacto accidental mano-ojo.
- Debido a que las pantallas faciales y las gafas de montura universal no protegen adecuadamente cuando hay exposición a nanomateriales en forma de aerosoles, es aconsejable el uso de una máscara completa ya que ofrece protección tanto de los ojos como de las vías respiratorias o bien el uso de gafas de montura integral que no dispongan de sistemas de ventilación junto con la media máscara.

- En cualquier caso, se deberá prestar especial atención a la **compatibilidad de uso simultáneo de protección ocular y respiratoria**, con objeto de que la utilización de uno no interfiera en el ajuste del otro, mermando su capacidad de protección.

En particular, la selección de un equipo de protección específico depende predominantemente de los datos provistos en la evaluación de riesgos, especialmente teniendo en cuenta lo siguiente:

- Estado físico del contaminante (polvo, fibra, humo, gas, vapor, etc.),
- Valor Límite Umbral (VLA) o Nivel de Exposición Ocupacional (OEL)
- Concentración de oxígeno durante la duración del trabajo o exposición,
- Peligro de la sustancia química, incluidas las propiedades asfixiantes
- Concentración máxima en la atmósfera,
- Adaptación del equipo al entorno de trabajo, al usuario y a las características de la tarea (capacidad de uso, adaptación),
- Otros riesgos (por ejemplo, salpicaduras, chispas, incendios ...) que están relacionados con el trabajo y pueden influir en la selección y el uso del equipo.

En base a esto, se puede ver una posible secuencia de acción a seguir en el proceso de selección de EPIs en la Figura 21. Existen ciertos factores que conducen ineludiblemente al uso de equipos aislantes, entre los que se destacan la deficiencia de oxígeno, el desconocimiento sobre contaminantes o atmósferas peligrosas para la vida o la salud. En otros casos, la selección del respirador y el nivel de filtración deben evaluarse siguiendo los criterios anteriores.

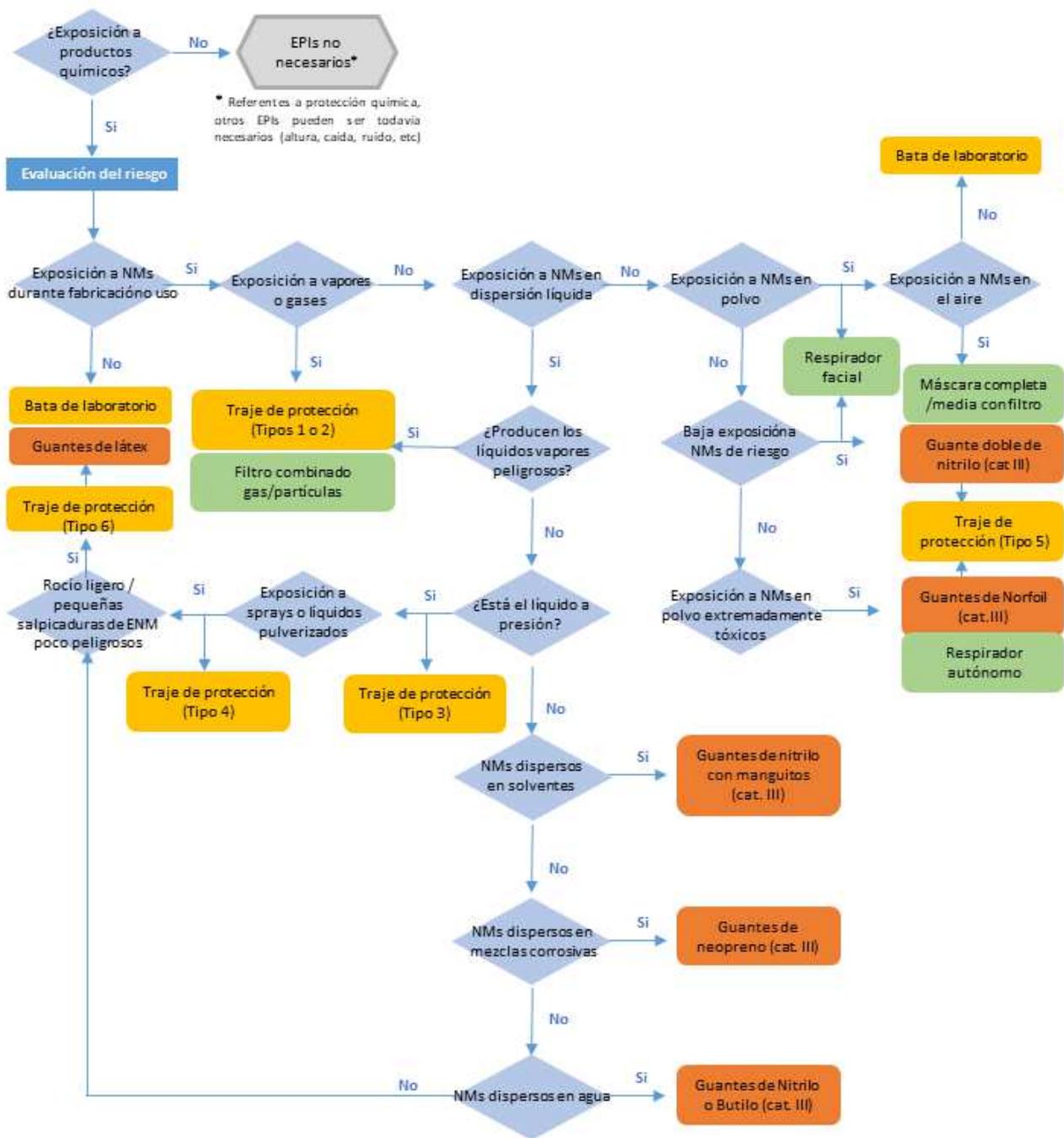


Figura 21. Árbol de decisión para la selección general de EPIs.



BIBLIOGRAFÍA



5. Bibliografía

5.1. Centros de referencia

- BAUA - [Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin](#) (Alemania)
- BSI - [British Standards Institution - ISO](#) (UK)
- ECHA - [Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas](#)
- EUON - [European Union Observatory for Nanomaterials](#)
- ICON - [Consejo Internacional de Nanotecnología](#)
- IDAEA -CSIC – [Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua](#) (España)
- IFA - [Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung](#) (Alemania)
- INRS – [Santé et sécurité au travail](#) (Francia)
- INSHT - [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo \(España\)](#)
- IOM - [Institute of Occupational Medicine](#) (UK)
- ISO - [International Organization for Standardization](#)
- NIOSH - [The National Institute for Occupational Safety and Health \(EEUU\)](#)
- OCDE - [Organización de Cooperación y Desarrollo Económico](#)
- RIVM – [Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu](#) (Países Bajos)
- [Safe Work Australia](#)
- SER - [Social and Economic Council of the Netherlands](#) (Países Bajos)

5.2. Publicaciones

- [1] Asbach, C., et al. 2012. "NanoGEM standard operation procedures for assessing exposure to nanomaterials, following a tiered approach". Tiered Approach for the assessment of exposure to airborne nanoobjects in workplaces Google Scholar.
- [2] Balazy et al; 2006, Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering-Facepiece Respirators Challenged with Nanoparticles, The Annals of Occupational Hygiene Volume 50, Issue 3 Pp. 259-269.
- [3] Ben Salah M, Hallé S, Tuduri L, " Efficiency of five chemical protective clothing materials against nano and submicron aerosols when submitted to mechanical deformations. J Occup Environ Hyg. 2016;13(6):425-33
- [4] Brochot C, Mouret G, Michielsen N, Chazelet S, Thomas D (2011) Penetration of nanoparticles in 5 nm to 400 nm size range through two selected fibrous media. J Phys Conf Ser 304:012068.
- [5] Brouwer, D., et al., 2011. Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects; report of a workshop. Annals of occupational hygiene, 56(1), 1-9.
- [6] BSI, 2010. (BSI PD 6699-3:2010) Nanotechnologies part 3: guide to assessing airborne exposure in occupational settings relevant to nanomaterials. London UK: British Standards Institution.
- [7] Cena L. G. and T. M. Peters. Characterization and Control of Airborne Particles Emitted Durind Production of Epoxy/Carbon Nanotube Nanocomposites. J. Occup. Environ. Hyg., 2011, 8, 86–92

- [8] Cena L.G., T.R. Anthony, T.M. Peters, A Personal Nanoparticle Respiratory Deposition (NRD) Sampler, *Environ Sci Technol.* 2011 Aug 1; 45(15): 6483–6490.
- [9] Chen S, Tsai C (2006) An axial flow cyclone to remove nanoparticles at low pressure conditions. *J Nanopart Res* 9:71-83.
- [10] Cherrie J. W. and T. Schneider, "Validation of a new method for structured subjective assessment of past concentrations," *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 43, pp. 235-245, 1999.
- [11] Directiva de Agentes Químicos (Directiva 98/24/CE) (<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1998-80770>)
- [12] Directiva marco 89/391/CEE - SST de 12 de junio de 1989 (<https://osha.europa.eu/es/legislation/directives/the-osh-framework-directive/the-osh-framework-directive-introduction>)
- [13] Duuren-Stuurnan B., S. Vinck, D. Browuer, D. Kroese, H. Heussen, K. Verbist, E. Tielemans, M. van Nitfrik and W. Fransman, "V9216: Stoffenanager Nano: Descriptio of the conceptual control banding model," TNO Report, 2011.
- [14] ECHA, "Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment - Chapter R.14: Occupational exposure assessment," European Chemical Agency, Helsinki, 2016.
- [15] ECHA, "Guidance on information requirements and Chemical Safety Assessment - Chapter R.16: Environmental exposure assessment," European Chemical Agency, Helsinki, 2016.
- [16] Förster H, Thajudeen T, Funk C, Peukert W (2016) Filtration and scavenging from waste incineration plants. *Waste Management* 52:346-352.
- [17] Förster H, Thajudeen T, Funk C, Peukert W. Separation of nanoparticles: Filtration and scavenging from waste incineration plants. *Waste Manag.* 2016 Jun; 52:346-52.
- [18] Ganser G. H. and Hewett.P., Models for nearly every occasion: Part 2-two box models. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 14(1):58–71, 2017.
- [19] Gao P, Jaques PA, Hsiao TC, Shepherd A, Eimer BC, Yang M, Miller A, Gupta B, Shaffer, R "Evaluation of nano- and sub-micron particle penetration through ten nonwoven fabrics using a wind-driven approach" *J Occup Environ Hyg.* 2011 Jan;8(1):13-22
- [20] Golanski L, Guillot A, Tardif, F "Are conventional protective devices such as fibrous filter media, cartridge for respirators, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols?" 2008 (Dissemination Report - DR-325/326-200801-1).
- [21] Golanski L, Guillot A, Tardif, F "Experimental evaluation of individual protection devices against different types of nanoaerosols: graphite, TiO₂ and Pt", Special focus: Safety of Nanoparticles, *Journal of Nanoparticle Research*, January 2010, Vol. 12, Issue 1, pp 83-89
- [22] Golanski L, Guiot A, Rouillon F, Pocachard J and Tardif F, "Experimental evaluation of personal protection devices against graphite nanoaerosols: fibrous filter media, masks, protective clothing, and gloves", *Hum Exp Toxicol.* 2009 Jun;28(6-7):353-9.
- [23] Guha S, Mejía-Alfaro A, Hariharan P, Myers MR. Effectiveness of facemasks for pediatric populations against submicron-sized aerosols. *Am J Infect Control.* 2015 Aug;43(8):871-7.
- [24] Guía Técnica del R.D. 374/2001 de Agentes Químicos (ed. Rev. 2013), INSHT
- [25] [GUIDEnano](http://www.guidenano.eu/) (FP7-604387) <http://www.guidenano.eu/>
- [26] Haghighat et al; 2012, Development of a Procedure to Measure the Effectiveness of N95 Respirator Filters against Nanoparticles, IRSST Report R-754

- [27] Hansen S. F. and B. Anders, "NanoRiskCat: a conceptual tool for categorization and communication of exposure potentials and hazards of nanomaterials in consumer products," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 16, no. 1, pp. 1-25, 2014.
- [28] Hansen S. F., A. Baun and K. Alstrup-Jensen, "NanoRiskCato - A Conceptual Decision Support Tool for Nanomaterials," Danish Environmental Protection Agency, 2011.
- [29] Health and Safety Executive (HSE), 2017. Controlling airborne contaminants at work A guide to local exhaust ventilation (LEV).
- [30] Heitbrink W. A., L.-M. Lo and K. H. Dunn. Exposure Controls for Nanomaterials at Three Manufacturing Sites. *J. Occup. Environ. Hyg.*, 2015, 12, 16–28
- [31] Hierarchy of controls. NIOSH
- [32] Höck J., T. Epprecht, E. Furrer, M. Gautschi, H. Hofmann, K. Höhener, K. Knauer, H. Krug, L. Limbach, P. Gehr, B. Nowack, M. Riediker, K. Schirmer, K. Schmidt, C. Som, C. Studer, A. Ulrich, N. Von Gotz, A. Weber, S. Wengert and P. Wick, "Guidelines on the Precautionary Matrix for Synthetic Nanomaterials," Federal Office of Public Health and Federal Office for the Environment, Berne, 2013.
- [33] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52008SC2036>
- [34] http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/nanotechnology-redirect.html
- [35] Huang S-H, Huang Y, Chen C-W, Chang C-P "Nanoparticles penetration through protective clothing materials". 3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health Taipei, Taiwan 2007
- [36] INSHT, 2015. Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- [37] Jensen K., A. Saber, H. V. L. B. Kristensen, A. C. Jensen, I. K. Koponen and W. H., "NanoSafer vs. 1.1 Nanomaterial risk assessment using first order modeling," in *Topical Scientific Workshop on Regulatory Challenges in Risk Assessment of Nanomaterials*, Helsinki, 2014.
- [38] Jeong SW, Kim H. Filtration of fullerene and copper oxide nanoparticles using surface-modified microfilters. *Environ Monit Assess.* 2014 Sep;186(9):5855-64.
- [39] Junsu Park, Byoung Kyu Kwak, Younghun Kim, Jongheop Yi "Efficiency of protective dermal equipment against silver nanoparticles with water aerosol", *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, Vol. 13, Issue 7, pp 3043-3049
- [40] Kim CS, Bao L, Okuyama K, Shimada M, Niinuma H (2005) Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *J Nanopart Res* 8:215–221.
- [41] Kim SC, Harrington MS, Pui DYH (2007) Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. *J Nanopart Res* 9:117–125.
- [42] Kwangseog Ahn, M.J. Ellenbecker, S.R. Woskie, L.J. DiBerardinis, Effects of work practices and upper body movements on the performance of a laboratory fume hood, 2015, *Journal of Chemical Health and Safety*, DOI10.1016/j.jchas.2015.10.022
- [43] Lee SA, Hwang DC, Li HY, Tsai CF, Chen CW, Chen JK. Particle Size-Selective Assessment of Protection of European Standard FFP Respirators and Surgical Masks against Particles-Tested with Human Subjects. *J Healthc Eng.* 2016;2016.
- [44] Li et al; 2012, Evaluation of Filter Media for Particle Number, Surface Area and Mass Penetrations, *The Annals of Occupational Hygiene* Volume 56, Issue 5 Pp. 581-594.
- [45] LIFE NanoRISK 2016. Guidance on recommended measures for mitigating the risk posed by engineered nanomaterials.

- [46] Liu J, Pui DYH, Wang J (2011) Removal of airborne nanoparticles by membrane coated filters. *Sci Total Environ* 409:4868–4874.
- [47] Liu K, Wey M (2007) Filtration of nano-particles by a gas-solid fluidized bed. *J Hazardous Mat* 147:618-624.
- [48] Lo L.-M., K. H. Dunn, C. D. Hammond, D. Marlow, J. Topmiller, C. S.-J. Tsai, M. Ellenbecker and C. C.-C. Huang, Evaluation of engineering controls in a manufacturing facility producing carbon nanotube-based products, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Report No. EPHB 356–13a, Cincinnati, OH, 2012b.
- [49] Lo L.-M., K. H. Dunn, C. D. Hammond, P. D. Almaguer, I. Bartholomew, J. Topmiller, C. S.-J. Tsai, M. Ellenbecker and C. C.-C. Huang, Evaluation of engineering controls for manufacturing nanofiber sheets and yarns, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Report No. EPHB 356–11a, Cincinnati, OH, 2012a
- [50] Ma H, Shen H, Shui T, Li Q, Zhou L. Experimental Study on Ultrafine Particle Removal Performance of Portable Air Cleaners with Different Filters in an Office Room. *Int J Environ Res Public Health*. 2016 Jan 5;13(1). pii: E102.
- [51] Mark M. Methner (2010) Effectiveness of a Custom-fitted Flange and Local Exhaust Ventilation (LEV) System in Controlling the Release of Nanoscale Metal Oxide Particulates During Reactor Cleanout Operations, *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 16:4, 475-487
- [52] Maynard AD, Pui DYH. *Nanoparticles and occupational health*. ISBN-10-1-4020-5858-6Springer; 2007. p186. Brochot C, Mouret G, Michielsen N, Chazelet S, Thomas D (2011) Penetration of nanoparticles in 5 nm to 400 nm size range through two selected fibrous media. *J Phys Conf Ser* 304:012068.
- [53] McCalman L, A. Sanchez Jimenez, E. Belut, R. Guichard, M. van Tongeren, L. Tran and J. Cherrie, “Quantitative Modelling of Occupational Exposure to Airborne Nanoparticles,” in *Indoor and Outdoor Nanoparticles - The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol. 48, Springer, 2016, pp. 181-207.
- [54] Methener, M. et al., 2010. Nanoparticle emission assessment technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials. Part A.*J. Occup. Environ. Hyg.*, 7, 127-132.
- [55] Mostofi et al; 2011; Investigation of Potential Affecting Factors on Performance of N95 Respirator, *Journal of the International Society for Respiratory Protection* Vol. 28, No. 1
- [56] [NanoMICEX](http://www.nanomicex.eu/) (FP7- 280713) <http://www.nanomicex.eu/>
- [57] [NanoREG](http://www.nanoreg.eu/) (FP7- 310584) <http://www.nanoreg.eu/>
- [58] [NanoRISK](http://www.lifenanorisk.eu/) (LIFE12 ENV/ES/000178) <http://www.lifenanorisk.eu/>
- [59] Nanosafe (2008). Are conventional protective devices such as fibrous filter media, respirator cartridges, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols? <http://www.nanosafe.org>
- [60] Nicas.M., *Mathematical models for estimating occupational exposure to chemicals*, chapter Two-zone model, pages 51–56. Fairfax, Va.: AIHA Press, 2000.
- [61] Oksel et al, 2016. Evaluation of existing control measures in reducing health and safety risks of engineered nanomaterials. *Environ. Sci. Nano*, 3. 869.
- [62] Old L, Methner MM. (2008) Engineering case report: effectiveness of local exhaust ventilation (LEV) in controlling engineered nanomaterial emissions during reactor cleanout operations. *J Occup Environ Hyg*; 5: D63–9.

- [63] Ostiguy C., M. Riediker, J. Triolet, P. Troisfontaines and D. Vernez, "Development of a specific Control Banding Tool for Nanomaterials," ANSES - French agency for food, environmental and occupational health and safety, 2010.
- [64] Ostraat, M., et al. 2015. Harmonized Tiered Approach to Measure and Assess the Potential Exposure to Airborne Emissions of Engineered Nano-Objects and their Agglomerates and Aggregates at Workplaces Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 55-ENV/JM/MONO (2015) 19. Paris: OECD Environment, Health and Safety Publications.
- [65] Paik S. Y., D. M. Zalk and P. Swuste, "Application of a Pilot Control Banding Tool for Risk Level Assessment and Control of Nanoparticle Exposures," *Annals of work exposures and health*, vol. 52, no. 6, pp. 419-428, 2008.
- [66] Peukert W. Wadenpohl C (2001) Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. *Powder Technology* 118:136-148.
- [67] Prasauskas T, Matulevicius J, Kliucininkas L, Krugly E, Valincius V, Martuzevicius D. Filter media properties of mineral fibres produced by plasma spray. *Environ Technol.* 2016 Jun;37(11):1315-24.
- [68] Pui, David Y.H. and Seong Chan Kim, 'Penetration of Nanoparticles through Respirator Filter Media', NIOSH Contract No. 254-2005-M-11698, Final Report, April 2, 2006.
- [69] Ramachandran, Gurumurthy, et al., 2011. "A strategy for assessing workplace exposures to nanomaterials". *Journal of occupational and environmental hygiene*. 8.11 (2011): 673-685.
- [70] Ramirez JA, O'Shaughnessy PT. The effect of simulated air conditions on N95 filtering facepiece respirators performance. *J Occup Environ Hyg.* 2016 Jul;13(7):491-500.
- [71] Real Decreto 374/2001 (<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-8436>)
- [72] Real Decreto 773/1997 (<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-12735>)
- [73] Reglamento (CE) n° 1272/2008 CLP (clasificación, etiquetado y embalaje) (<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-82637>)
- [74] Reglamento REACH (<https://echa.europa.eu/es/regulations/reach/understanding-reach>)
- [75] Rengasamy et al, 2011a, Evaluation of the filtration performance of NIOSH-approved N95 filtering-face piece respirators by photometric and number-based test methods, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8, 23–30.
- [76] Rengasamy et al; 2009, Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE marked filtering face piece respirators, *Annals of Occupational Hygiene*, 53(2), 117–128.
- [77] Rengasamy S, Walbert G, Newcomb W, Coffey C, Wassell JT, Szalajda J. Protection factor for N95 filtering facepiece respirators exposed to laboratory aerosols containing different concentrations of nanoparticles. *Ann Occup Hyg.* 2015 Apr;59(3):373-81.
- [78] Review of Safety Practices in the Nanotechnology Industry, Phase One Report: Current Knowledge and Practices Regarding Environmental Health and Safety in the Nanotechnology Workplace, ICON, 2006
- [79] Sahu M. and P. Biswas. Size distributions of aerosols in an indoor environment with engineered nanoparticles synthesis reactors operating under different scenarios. *J. Nanopart. Res.*, 2010, 12, 1055–1064.
- [80] [Scaffold](http://scaffold.eu-vri.eu/) (FP7- 280535) <http://scaffold.eu-vri.eu/>
- [81] Seto T, Furukawa T, Otani Y, Uchida K, Endo S (2010) Filtration of multi-walled carbon nanotube aerosol by fibrous filters. *Aerosol Sci Technol* 44:734–740.
- [82] Shin WG, Mulholland GW, Kim SC, Pui DYH (2008) Experimental study of filtration efficiency of nanoparticles below 20 nm at elevated temperatures. *J Aerosol Sci* 39:488–499.

- [83] Soo JC, Monaghan K, Lee T, Kashon M, Harper M. Air sampling filtration media: Collection efficiency for respirable size-selective sampling. *Aerosol Sci Technol*. 2016 Jan;50(1):76-87.
- [84] Steffens J, Coury JR (2007a) Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I—homogeneous fibers. *Sep Purif Technol* 58:99–105.
- [85] Steffens J, Coury JR (2007b) Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles II. Heterogeneous fibers. *Sep Purif Technol* 58:106–112.
- [86] SÜD T., "CENARIOS®- the first nanotechnology risk management and monitoring system," TÜV SÜD Industrie Service GmbH.
- [87] Tsai C. S.-J., D. White, H. Rodriguez, C. E. Munoz, C.-Y. Huang, C.-J. Tsai, C. Barry and M. J. Ellenbecker, J. *Nanopart. Res.*, 2012, 14, 1–14.
- [88] Tsai SJ, Huang RF, Ellenbecker MJ., Airborne nanoparticle exposures while using constant-flow, constant-velocity, and air-curtain-isolated fume hoods, *Ann Occup Hyg*. 2010 Jan; 54(1):78-87. doi: 10.1093/annhyg/mep074
- [89] Tsang M. P., D. Hristozov, A. Zabeo, A. J. Koivisto, A. C. O. Jensen, K. A. Jensen, C. Pang, A. Marcomini and G. Sonnemann, "Probabilistic risk assessment of emerging materials: case study of titanium dioxide nanoparticles," *Nanotoxicology*, vol. 11, no. 4, pp. 558-568, 2017.
- [90] van Harmelen T., E. K. Zondervan-van den Beuken, D. H. Brouwer, E. Kuijpers, W. Fransman, H. B. Buist, T. N. Ligthart, I. Hincapié, R. Hischer, I. Linkov, B. Nowack, J. Studer, L. Hilty and C. Som, "LICARA nanoSCAN - A tool for the self-assessment of benefits and risks of nanoproducts," *Environment International*, vol. 91, pp. 150-160, 2016.
- [91] Vinches L, Testori N, Dolez P, Perron G, Wilkinson K.J., Hallé S "Experimental evaluation of the penetration of TiO2 nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use" *Nanoscience Methods*, Volume 2, Issue 1, 2013
- [92] Vo E, Zhuang Z, Horvatin M, Liu Y, He X, Rengasamy S. Respirator Performance against Nanoparticles under Simulated Workplace Activities. *Ann Occup Hyg*. 2015 Oct;59(8):1012-21. doi: 10.1093/annhyg/mev042.
- [93] Vo et al; Development of a new test system to determine penetration of multi-walled carbon nanotubes through filtering facepiece respirators, *Journal of Aerosol Science* 61 50–59, (2013)
- [94] Wang J, Tronville P (2014) Toward standardized test methods to determine the effectiveness of filtration media against airborne nanoparticles. *J Nanopart Res* 16:2417.
- [95] Wang Q, Golshahi L, Chen DR. Advanced Testing Method to Evaluate the Performance of Respirator Filter Media. *J Occup Environ Hyg*. 2016 Apr 22:0. [Epub ahead of print].
- [96] Wilkes et al; 2002a, Measuring the filtration performance of breathing system filters using sodium chloride particles, *Anaesthesia*, 2002, 57, pages 162-168
- [97] Wilkes et al; 2002b, Comparison of two techniques for measuring penetration of sodium chloride particles through breathing system filters, *British Journal of Anaesthesia*, 89, 541–545.
- [98] Zalk D. M., R. Kamerzell, S. Paik, J. Kapp, D. Harrington and P. Swuste, "Risk Level Based Management System: A Control Banding Model for Occupational Health and Safety Risk Management in a Highly Regulated Environment," *Industrial Health*, vol. 48, pp. 18-28, 2010.
- [99] Zalk M. D., S. Y. Paik and P. Swuste, "Evaluating the Control Banding Nanotool: a qualitative risk assessment method for controlling nanoparticle exposures," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 11, p. 1685, 2009.



nano
↑IMPULSA

GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA
EL USO SEGURO DE

**NANO
MATERIALES**