

# EXPOSICIÓN POTENCIAL A NANOMATERIALES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN



DOCUMENTOS DIVULGATIVOS



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE EMPLEO  
Y SEGURIDAD SOCIAL

**Título:**

Exposición potencial a nanomateriales en el sector de la construcción

**Autor:**

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

**Elaborado por:**

Josefa Aguilar Franco

Mercedes Colorado Soriano

Virginia Gálvez Pérez

M<sup>a</sup> Teresa Sánchez Cabo

M<sup>a</sup> Encarnación Sousa Rodríguez

Centro Nacional de Nuevas Tecnologías (CNNT)-Madrid. INSSBT

**Edita:**

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

C/ Torrelaguna, 73 - 28027 Madrid

Tel. 91 363 41 00, fax 91 363 43 27

[www.inssbt.es](http://www.inssbt.es)

**Composición:**

Azcárate & Asocia2

**Edición:**

Madrid, diciembre 2017

**NIPO** (en papel): 272-17-073-8

**NIPO** (en línea): 272-17-074-4

**Déposito legal:** M-35443-2017

**Hipervínculos:**

El INSSBT no es responsable ni garantiza la exactitud de la información en los sitios web que no son de su propiedad. Asimismo la inclusión de un hipervínculo no implica aprobación por parte del INSSBT del sitio web, del propietario del mismo o de cualquier contenido específico al que aquel redirija.

**Catálogo general de publicaciones oficiales:**

<http://publicacionesoficiales.boe.es>

**Catálogo de publicaciones del INSSBT:**

<http://www.inssbt.es/catalogopublicaciones/>



**EXPOSICIÓN POTENCIAL  
A NANOMATERIALES EN EL SECTOR  
DE LA CONSTRUCCIÓN**



## ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	6
1. INTRODUCCIÓN AL SECTOR .....	8
2. PRINCIPALES NANOMATERIALES EN EL SECTOR .....	9
3. NANOTOXICOLOGÍA .....	12
4. EXPOSICIÓN A NANOMATERIALES.....	13
5. MEDIDAS PREVENTIVAS.....	15
5.1. Eliminación y sustitución .....	15
5.2. Medidas de control técnico.....	16
5.3. Medidas organizativas .....	16
5.4. Protección individual.....	17
6. ESTUDIO CUANTITATIVO DE LA EXPOSICIÓN A NANOMATERIALES .....	18
6.1. Objeto .....	19
6.2. Alcance.....	19
6.3. Nanomateriales del estudio.....	20
6.4. Metodología .....	22
6.5. Descripción de los procesos (escenarios de exposición).....	25
6.6. Equipos de medida .....	35
6.7. Procedimiento de medida.....	37
6.8. Resultados .....	38
6.9. Conclusiones del estudio.....	54
7. CONCLUSIONES GENERALES .....	58
BIBLIOGRAFÍA .....	61

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Las extraordinarias propiedades químicas y físicas que presentan los nanomateriales están dando lugar a un incremento de sus aplicaciones en los distintos sectores y actividades económicas, ya que aportan nuevas características de funcionalidad y mejoran la calidad de los productos empleados. A pesar del incremento en el desarrollo de nuevos nanomateriales y aunque en los últimos años está aumentando el número de estudios que ponen de manifiesto los peligros que este tipo de materiales pueden suponer para la salud humana, actualmente se desconoce el alcance de los riesgos que pueden presentar para la salud humana y ambiental.

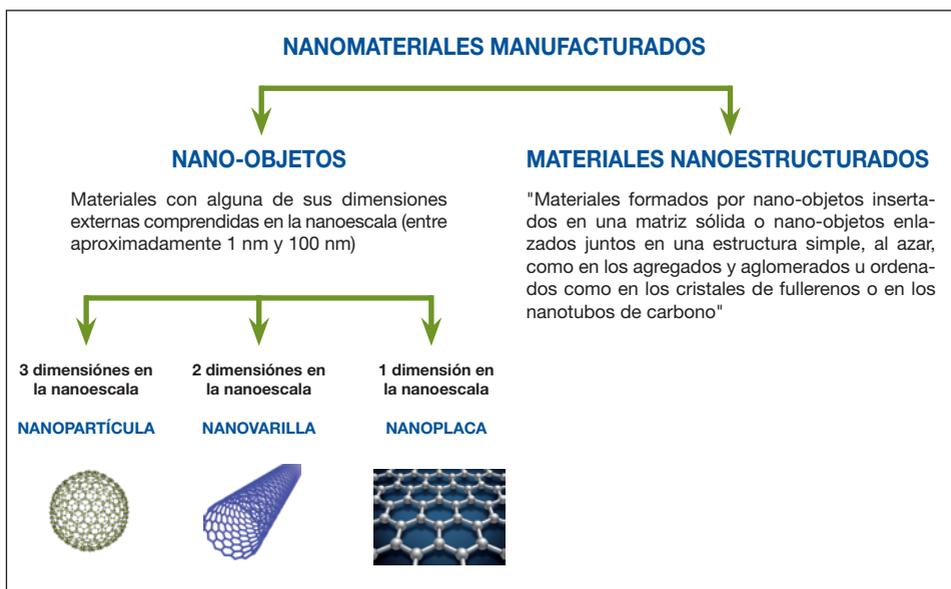


Figura 1. Clasificación y definiciones de los nanomateriales manufacturados [1].

La peligrosidad intrínseca de los nanomateriales manufacturados está relacionada fundamentalmente con su tamaño, forma, estructura, solubilidad y estado de agregación o de aglomeración. Debido a su pequeño **tamaño**, el área superficial de los nanomateriales es mucho mayor que la del material de la misma composición a escala micro, además de ser más reactivos por unidad de masa, y presentar características físico-químicas distintas. Aparte del tamaño, la **forma** también tiene un papel fundamental en el comportamiento tóxico, así, por ejemplo, las partículas esféricas suelen ser menos tóxicas que las que tienen forma de fibra. La **solubilidad** también es un factor importante, ya que al disolverse el nanomaterial en el organismo se comportaría como un material de tamaño no nano. Respecto al **estado de agregación** o **aglomeración**, cabe considerar que este influye en la posibilidad real de exposi-



ción al material. Los agregados se forman por la unión de partículas nanométricas primarias, con la característica de que quedan fuertemente enlazadas, haciendo que la superficie del agregado sea considerablemente menor que la suma de las superficies de cada partícula individual. Por el contrario, aunque compartiendo el mismo concepto en cuanto a su formación, los aglomerados se caracterizan por uniones débiles que hacen que la superficie del aglomerado sea similar a la que proporciona la suma de las superficies de las partículas individuales. Los agregados o aglomerados pueden alcanzar unas dimensiones externas superiores a los 100 nm. Igualmente, la **estructura**, amorfa o cristalina, también afectaría a la intensidad de cualquier peligro potencial del material. Aunque actualmente no se dispone de suficiente información sobre los mecanismos de toxicidad para la mayoría de los nanomateriales, se puede considerar que el principal mecanismo es la inducción del estrés oxidativo, mediante la generación de radicales libres y peróxidos que alteran el estado normal redox, produciendo un daño en los componentes de las células, las proteínas, los lípidos y el ADN.

Además de la peligrosidad intrínseca, el riesgo está evidentemente asociado al nivel de exposición a los nanomateriales. El riesgo será más importante en las operaciones en las que los nanomateriales puedan ser inhalados, por ejemplo, cuando forman parte del polvo producido en las tareas mecánicas.

A pesar de que existen estudios sobre la toxicidad y exposición a nanomateriales, el conocimiento de sus efectos sobre la salud humana es limitado, y evoluciona con el progreso técnico, lo que implica asumir la incertidumbre sobre las consecuencias reales que pueden causar sobre los trabajadores expuestos.

Por ello, la valiosa oportunidad que ofrecen los nanomateriales para la competitividad de las empresas debe ir necesariamente acompañada de la actualización del conocimiento por parte de los usuarios sobre los posibles efectos adversos para la salud de los trabajadores y de la adopción de las medidas necesarias para controlar el riesgo. En este sentido, el objetivo de este documento es describir, con carácter divulgativo y conforme al conocimiento actual, los riesgos que la presencia de los nanomateriales pueden suponer para los trabajadores en las distintas actividades económicas y proponer medidas para eliminar o reducir el riesgo al mínimo.

Así, la colección consta de distintos documentos correspondientes a las actividades económicas donde los nanomateriales tienen una mayor presencia o perspectivas de uso. En cada uno de estos documentos se identifica, en primer lugar, cuáles son los nanomateriales más utilizados en la actividad económica y las aplicaciones que tienen. Posteriormente, se estima el riesgo para la salud de los trabajadores originado por estos nanomateriales en función de su toxicidad y el nivel de exposición esperado en los distintos puestos de trabajo u operaciones propias de la actividad. Por último, se recogen algunas recomendaciones y medidas a adoptar para eliminar o reducir este riesgo. Teniendo en cuenta la incertidumbre sobre el riesgo real que su-

pone la exposición a los nanomateriales, las recomendaciones y medidas recogidas en cada documento están propuestas bajo el **principio de precaución**, tomando en consideración que, para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, la aplicación de este principio se hará más necesario a medida que aumenta la toxicidad de los nanomateriales y el nivel de exposición esperado.

Finalmente cabe resaltar que las indicaciones y recomendaciones recogidas en cada uno de los documentos deben adaptarse a cada situación concreta y se tienen que entender como complementarias a las obligaciones, y sin perjuicio de las mismas, establecidas en la normativa de prevención de riesgos laborales, especialmente las indicadas en el Real Decreto 374/2001 sobre la protección de la seguridad y la salud de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.

## 1. INTRODUCCIÓN AL SECTOR

El sector de la Construcción se ha asociado tradicionalmente a un elevado riesgo de accidentes laborales; sin embargo, los trabajadores del sector también están expuestos a una amplia variedad de agentes físicos y químicos en la mayoría de las fases del proceso constructivo que pueden suponer importantes riesgos para su salud [2, 3, 4]. Actualmente, muchos de estos agentes químicos a los que están expuestos los trabajadores de la construcción proceden de productos nuevos o materiales que, debido a las buenas cualidades que aportan en determinados elementos u operaciones constructivas, tienen cada vez una mayor utilización en este sector.

En este sentido, en los últimos años, la presencia de nanomateriales manufacturados en el sector de la Construcción se ha incrementado de forma muy significativa en numerosos elementos y procesos, ya que presentan cualidades y comportamientos diferentes a los de los materiales tradicionalmente utilizados en el sector, aportando una mejora significativa a los mismos. Por este motivo, la investigación y desarrollo de nuevos materiales en construcción van ligados a la incorporación de nanomateriales que aportan mayor eficiencia energética, sostenibilidad, aislamiento térmico, etc., por lo que se prevé que su aplicación en el futuro sea muy notable.

Uno de los problemas que conlleva la utilización de nanomateriales en productos que van a ser utilizados en este sector es el escaso conocimiento por parte de los contratistas, los subcontratistas y los representantes de los trabajadores del uso de los mismos en sus empresas. Una encuesta realizada en el año 2009 por la Federación Europea de la Industria de la Construcción (FIEC) y por la Federación Europea de Trabajadores de la Construcción y de la Madera (EFBWW) desveló que un 71% de los empresarios y un 80% de los representantes de los trabajadores desconoce que los productos y materiales que utilizan en su empresa contienen nanomateriales y, por tanto, no se tienen en cuenta en la evaluación de riesgos ni en la planificación de las medidas preventivas, quedando desprotegidos los trabajadores frente a estos riesgos [5].

## 2. PRINCIPALES NANOMATERIALES EN EL SECTOR

La utilización de nanomateriales en las construcciones modernas está cada vez más extendida. Entre sus aplicaciones se incluye su utilización, por ejemplo, en el cemento, confiriéndole alta durabilidad; en cerramientos, para fabricar cristales auto-limpiables; en aplicaciones relacionadas con la seguridad y el confort, para obtener superficies bactericidas, recubrimientos retardantes de llama, etc.; y en aplicaciones para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia energética incrementando el aislamiento térmico. Muchas de las aplicaciones estudiadas hasta el momento no se han introducido en el mercado debido a su coste económico. Actualmente, los materiales en tamaño nano más utilizados en este sector son el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), mientras que otros, como los nanotubos de carbono (CNT), se están estudiando para poder ser incluidos en algunos materiales de construcción aunque en la actualidad apenas se usan. En el futuro cabe esperar una mayor presencia de nanomateriales en este sector, ya que actualmente muchos de ellos se encuentran en proceso de investigación.



En la Tabla 1 se detallan de forma no exhaustiva los productos con nanomateriales que pueden utilizarse en el sector de la Construcción, indicándose qué tipo de nanomaterial incorpora y cuáles son las propiedades nuevas que aporta.

APLICACIONES EN OBRA	PRODUCTO	NANOMATERIAL	PROPIEDADES
<b>ESTRUCTURAS</b> (Hormigón, cemento, acero, etc.)	<b>HORMIGÓN Y CEMENTO</b>	Nanotubos de carbono	Durabilidad, resistencia al agrietamiento.
		SiO <sub>2</sub>	Refuerzo de resistencia mecánica, reducción de la corrosión y reducción de la permeabilidad al agua.
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Incremento de la fuerza de compresión, resistencia a la abrasión.
		TiO <sub>2</sub>	Durabilidad, auto-limpieza, actividad fotocatalítica en exteriores (en investigación para interiores y bajo luz artificial), rápida hidratación, incremento del grado de hidratación.
		Grafeno	Aumento de impermeabilidad, flexión y plasticidad.
	<b>ACERO</b>	Cu	Soldabilidad, resistencia a la corrosión.
		V Mo	Resistencia a la fractura en juntas y tornillos.
Mg Ca		Aumenta la dureza en soldaduras, resistencia al desgaste del acero inoxidable.	
<b>ACABADOS Y REVESTIMIENTOS</b> (Pinturas, resinas, elementos cerámicos, etc.)	<b>MATERIALES CERÁMICOS</b>	Nanotubos de carbono	Mejora las propiedades mecánicas y térmicas.
		SiO <sub>2</sub>	Refrigerante, antirreflejo, resistencia al fuego.
	<b>PINTURAS</b>	Ag	Actividad biocida.
		ZnO TiO <sub>2</sub>	Resistencia, actividad fotocatalítica, actividad biocida, auto-limpieza, mantiene la transparencia, hidrofóbico.
		SiO <sub>2</sub>	Mejora la adhesión, durabilidad.
		Polímeros de fluorocarbono	Repelente agua/grasa.
		Nanotubos de carbono y nanoarcillas	Mejora la resistencia al fuego.
	<b>RECUBRIMIENTOS DE METALES</b>	Grafeno	Durabilidad, resistencia, actividad fotocatalítica, actividad biocida.
		Nanotubos de carbono. Fibras de polipropileno	Mejora la resistencia al fuego.
		Nanocerámicos y fosfato de Fe, Zn y Mn	Protección contra la corrosión.

APLICACIONES EN OBRA	PRODUCTO	NANOMATERIAL	PROPIEDADES
<b>ACABADOS Y REVESTIMIENTOS</b> (Pinturas, resinas, elementos cerámicos, etc.)	RECUBRIMIEN- TOS DE MADERA (interior y exterior)	SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Resistencia al rayado. Mejora la elasticidad.
		ZnO CeO <sub>2</sub>	Protección de la madera frente a la radiación UV.
		Polímeros de fluorocarbono	Repelente agua, superficies fáciles de limpiar.
		Hidrotalcita en forma de nanoarcilla	Previene la decoloración de madera bloqueando la liberación de taninos.
	RECUBRI- MIENTOS DE PRODUCTOS CERÁMICOS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	Resistencia al rayado, durabilidad, fácil limpieza, repelente agua/aceite, reducción de los NOx producidos por el tráfico.
<b>AISLAMIENTOS/ CERRAMIENTOS</b> (Ventanas, ladrillos, puertas, etc.)	VENTANAS	SiO <sub>2</sub>	Resistencia al fuego o al calor, antirreflejo.
		TiO <sub>2</sub>	Anti-empañamiento, resistencia a la suciedad.
		WO <sub>3</sub>	Puede cambiar las propiedades ópticas mediante aplicación de un voltaje externo (electrocromismo), refleja la radiación infrarroja.
		Ag, SiO <sub>2</sub> , polímeros de fluorocarbono	Auto-limpieza.
		Otros	Bloqueo de la entrada de luz y del calor. Efecto termocromático, fotocromático y electrocromático.
<b>INSTALACIONES</b> (Tubos, cableado, paneles solares, calefacción, aire acondicionado, telefonía, etc.)	CELDAS SOLARES	Nanotubos de carbono	Transmisión efectiva de electrones.
		TiO <sub>2</sub>	Generación de energía.
<b>INFRAESTRUCTURAS</b> (Carreteras, ferrocarril, etc.)	ASFALTO, PAVIMENTOS DE CARRETERAS, PANTALLAS ACÚSTICAS Y TÚNELES	TiO <sub>2</sub>	Durabilidad, reducción del ruido, reducción de contaminantes del aire. Actividad fotocatalítica en paredes de túneles.

Tabla 1. Nanomateriales utilizados o en estudio para ser aplicados en el sector de la Construcción.

### 3. NANOTOXICOLOGÍA

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los estudios toxicológicos realizados con algunos de los nanomateriales utilizados en el sector de la Construcción. Estos datos pueden ser útiles para evaluar los efectos para la salud que puede conllevar la exposición a este tipo de nanomateriales.

NANOMATERIAL	EFECTOS
Dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> )	<p>Por vía inhalatoria puede producir efectos inflamatorios y genotóxicos. La inflamación, que en ocasiones puede ser reversible, depende de la relación área superficial por unidad de masa y de la duración y concentración de la exposición.</p> <p>Hay estudios que muestran que la toxicidad de la forma anatasa del TiO<sub>2</sub> es mayor que la de la forma rutilo [6]. En estudios <i>in vitro</i>, el TiO<sub>2</sub> anatasa induce estrés oxidativo en el tejido pulmonar humano con daño en el ADN. En exposiciones a largo plazo del TiO<sub>2</sub> anatasa, se han observado efectos cancerígenos [7]. A través de la piel intacta no se absorbe el TiO<sub>2</sub>.</p>
Óxido de zinc (ZnO)	<p>Los estudios realizados muestran que produce reacciones de estrés oxidativo en el tejido pulmonar y daño en el ADN. Por vía inhalatoria se han observado efectos inflamatorios en el pulmón y efectos sistémicos; la distribución en el organismo se ve afectada por la solubilidad de las partículas. En estudios realizados <i>in vitro</i> se han observado efectos genotóxicos, mientras que en los estudios <i>in vivo</i> dichos efectos fueron negativos. Por vía dérmica la absorción es limitada y no se han observado efectos locales [8].</p>
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	<p>La toxicidad depende de la estructura cristalina que presente. La sílice amorfa, al contrario que la sílice cristalina, presenta baja toxicidad y no produce fibrosis progresiva. El humo de sílice está compuesto principalmente por sílice amorfa, aunque puede contener mayor o menor porcentaje de sílice cristalina, dependiendo del proceso productivo [9].</p>
Nanotubos de carbono (CNT)	<p>Pueden ser de pared simple (SWCNT) o de pared múltiple (MWCNT). Ejercen toxicidad pulmonar: inflamación, fibrosis y granulomas epitelioides. La toxicidad de los CNT está relacionada con el tipo de nanotubo (SWCNT o MWCNT), la rigidez y su relación longitud/diámetro. También influye en la toxicidad el proceso de síntesis y la presencia de grupos activos, por ejemplo, ácidos carboxílicos. Durante la síntesis se utilizan catalizadores como hierro y níquel que pueden quedar como pequeñas impurezas y aumentar su toxicidad. Se pueden asumir unas reacciones similares al amianto en el caso de los nanotubos de cualquier composición que se presenten en forma de fibras sueltas, no como fibras cortas o enmarañadas. Se ha observado que los CNT con longitud superior a 20 μm estarían relacionados con el mesotelioma [10].</p>
Óxido de cobre (CuO)	<p>Las partículas nanométricas de CuO presentan una mayor toxicidad que las de cobre metálico estabilizado. La solubilidad de este nanomaterial y la liberación del cobre son las responsables del efecto tóxico, produciendo una respuesta inflamatoria [11, 12].</p>

NANOMATERIAL	EFECTOS
Plata (Ag)	El conocimiento de los efectos tóxicos producidos por las partículas nanométricas de plata es escaso. Al penetrar por vía inhalatoria se distribuyen por la sangre, pudiéndose acumular en diversos tejidos y producir efectos en el hígado y el sistema inmunológico. A través del nervio olfativo pueden alcanzar el cerebro. De la plata en tamaño nano se conoce su efecto letal en bacterias y fibroblastos [13]. En estudios <i>in vitro</i> , en macrófagos pulmonares, llevados a cabo con agregados de partículas nanométricas de plata, se ha observado mayor toxicidad que la producida por el crisotilo.

Tabla 2. Efectos para la salud de algunos nanomateriales utilizados en el sector de la Construcción.

#### 4. EXPOSICIÓN A NANOMATERIALES

Con carácter general, debido a la naturaleza de los productos que se utilizan y a las actividades que se realizan en el sector de la Construcción, la vía principal de entrada al organismo es la inhalatoria. La vía dérmica también puede ser importante, aunque en menor medida, en aquellas tareas en las que haya un contacto directo del cuerpo del trabajador con productos que contengan nanomateriales y que estos puedan desprenderse [5].

Generalmente, los nanomateriales presentes en la construcción se van a encontrar embebidos en una matriz, integrados en la estructura de otros productos como aditivos. Por lo tanto, es difícil conocer el nivel de exposición real a los mismos, ya que para que exista exposición a nanomateriales, estos deberían liberarse de su matriz en el ambiente o una vez dentro del organismo. Esta liberación depende de diversos factores, tales como la solubilidad y presentación del producto con nanomateriales, del proceso al que se somete, de las condiciones a las que está expuesto el producto, etc. [14].

Considerando lo anterior, las operaciones en las que cabe esperar una mayor exposición son aquellas en las que se puede generar mayor cantidad de aerosoles (generalmente en forma de polvo y en ciertos casos en forma de niebla), aunque existe incertidumbre sobre el porcentaje de nanomateriales que se liberan. Algunas de estas actividades propias del sector de la Construcción son las siguientes:

- Manejo de los productos con nanomateriales: recepción, mezclado y preparación del material, etc.
- Puesta en obra de productos con nanomateriales: aplicación o pulverización de pinturas, revestimientos, productos aislantes o impermeabilizantes, etc.
- Operaciones mecánicas sobre elementos constructivos formados por nanomateriales: corte, lijado, taladrado, perforado, demoliciones, etc.
- Gestión en obra de los residuos de elementos de construcción y demolición que contienen nanomateriales.



Figura 2. Posibles rutas de exposición durante el ciclo de vida de los nanomateriales en el sector de la Construcción.

Además, se debe tener en cuenta que en actividades al aire libre, como son las predominantes en este sector, la dirección y velocidad del viento y la presencia de partículas naturales son factores que van a influir de forma importante en los niveles de exposición. Otro factor importante relacionado con el nivel de exposición es

la existencia de partículas de fondo con dimensiones nanométricas, denominadas nanomateriales incidentales. Estos nanomateriales no son producidos de forma intencionada, sino que proceden fundamentalmente de humos de soldadura y de la emisión de motores diésel procedentes de la utilización de equipos y maquinaria utilizados en el sector (maquinaria de movimiento de tierras y otros vehículos pesados, grupos electrógenos, etc.). Según algunos estudios, los nanomateriales incidentales puede suponer la concentración mayoritaria a partículas nanométricas a las que se encuentran expuestos los trabajadores [15].

## 5. MEDIDAS PREVENTIVAS

La evaluación del riesgo por exposición a nanomateriales dará la información necesaria para decidir si son necesarias o no medidas preventivas y la naturaleza de las mismas. Tal y como se ha comentado, no siempre se va a disponer de información sobre el nanomaterial y sobre su posible liberación al ambiente. Por lo tanto, la aplicación de medidas preventivas en un contexto de incertidumbre se hará siguiendo el principio de precaución.

La información sobre la presencia de nanomateriales en los productos y materiales de construcción debe ser conocida en la obra para que las medidas preventivas que a continuación se enumeran puedan implantarse y resulten efectivas.

Estas medidas preventivas son similares a las que se emplean para reducir la generación o dispersión de polvo en los puestos de trabajo, por ello, en muchos casos no van a ser específicas para los nanomateriales.

### 5.1. Eliminación y sustitución

Aunque es la medida prioritaria para el control del riesgo, no es fácil su aplicación cuando se trata de nanomateriales. Esto es debido a que los nanomateriales se añaden a los productos de construcción con un objetivo concreto: conferirle unas propiedades especiales y, a veces, únicas. El adoptar una medida de este tipo supone, por tanto, valorar, por un lado, los beneficios y, por otro, los riesgos asociados a su uso.

La preparación de materiales de construcción en el puesto de trabajo es una operación que puede implicar exposición de los trabajadores a nanomateriales. Un factor de riesgo es la forma en la que se presenta el material, por ello, se seleccionarán, siempre que sea posible, materiales o productos prefabricados que no requieran una preparación previa para su puesta en obra. En el caso de que esto no fuera posible, es preferible seleccionar nanomateriales contenidos en una matriz sólida o líquida (dispersión, suspensión, pasta, encapsulamiento, etc.) que no tengan tendencia a la generación de polvo. Cuando los aditivos deban permanecer en forma de polvo, por ejemplo, en el caso del humo de sílice para hormigón de ultra alta resistencia (*ultra high performance concrete*, UHPC), existen otro tipo de soluciones tales como ma-

teriales de embalaje que se disuelven en agua y que no afectan a las características del producto final [16].

## 5.2. Medidas de control técnico

A continuación, se dan una serie de pautas para que las operaciones que generan mayor concentración de polvo o niebla se realicen con un mayor grado de seguridad:

- Siempre que sea posible, se realizará el trabajo con un método húmedo. Existen equipos portátiles que llevan incorporado un sistema de aporte de agua [17].
- Preferiblemente, se emplearán herramientas manuales o equipos portátiles de baja velocidad.
- Cuando no sea posible el trabajo en húmedo, se recomienda utilizar equipos con sistemas de aspiración y recogida de polvo incorporados o unidades móviles de aspiración [17]. Los filtros HEPA H14 o ULPA han demostrado ser eficaces para la captura de partículas nanométricas [18].
- En el caso de operaciones de pintura y revestimiento, será preferible utilizar brochas o rodillos frente a equipos de pulverización o espray.
- En los trabajos que se realicen al aire libre, la colocación del trabajador frente a la fuente de emisión se hará considerando la dirección del viento, para protegerse a sí mismo y al resto de trabajadores.
- Se podría considerar la posibilidad de utilizar una burbuja de contención o bolsas-sacos de guantes, para confinar el polvo durante las operaciones de mecanizado y demolición y evitar su emisión al ambiente en la recogida y gestión de residuos generados.

## 5.3. Medidas organizativas

Las medidas organizativas constituyen un buen complemento de las medidas técnicas. A continuación, se detallan algunos ejemplos:

- Limitar al mínimo necesario la presencia de trabajadores durante las operaciones en las que se pueda generar polvo y se puedan liberar nanomateriales.
- Delimitar y señalizar los puestos de trabajo donde se emite polvo que puede contener nanomateriales.
- Se recomienda que la limpieza de los puestos de trabajo con presencia de nanomateriales se realice por aspiración, utilizando para ello aspiradores industriales equipados con filtros HEPA H14 o filtros ULPA, o mediante vía húmeda. Evitar en estos puestos el barrido con cepillo o con aire comprimido.
- Prestar mayor atención a las medidas de higiene personal en las pausas y al finalizar las tareas con presencia de nanomateriales.

- Garantizar el adecuado mantenimiento de los equipos de trabajo y de los equipos de extracción y ventilación, especialmente en los lugares cerrados (túneles, depósitos, arquetas, etc.).
- Realizar el transporte en la obra de los productos en polvo en envases cerrados y correctamente identificados.
- Dar formación e información a los trabajadores sobre los materiales de la construcción que puedan suponer exposición a nanomateriales, los riesgos asociados y las medidas preventivas a adoptar.

#### 5.4. Protección individual

Los equipos de protección individual están indicados cuando las medidas son insuficientes o técnicamente inviables, cuando se trata de operaciones puntuales o ante situaciones de emergencia. Cuando se manipulen nanomateriales de elevada peligrosidad o cuando exista un alto grado de desconocimiento de las propiedades peligrosas de los mismos, se recomienda utilizar equipos de protección individual como complemento a las otras medidas adoptadas. Cuando sea necesario recurrir a estos, se llevará a cabo un programa para la adecuada selección, ajuste, entrenamiento y mantenimiento de los equipos que se vayan a usar.



Hay varios estudios que demuestran que los equipos de protección individual utilizados para partículas en escala micro son eficaces frente a partículas nanométricas [19]. La protección de las vías respiratorias se realizará mediante un adaptador facial equipado con un filtro de partículas de tipo P3. Para garantizar la estanqueidad y el correcto funcionamiento del equipo es importante realizar un buen ajuste con la cara del trabajador y respetar el tiempo de uso indicado por el fabricante. Si el equipo de protección respiratoria no cubre los ojos, se considerará la utilización de gafas

de protección. En las operaciones en las que se espera un mayor riesgo, debido a la peligrosidad del nanomaterial o a la alta exposición a aerosoles como, por ejemplo, corte, lijado, taladrado, perforado, demoliciones, pulverización de pinturas, etc., es recomendable seleccionar equipos que garanticen una protección mayor, como máscaras completas acopladas a filtros P3 o equipos filtrantes de partículas que garanticen una presión positiva en el interior de la pieza facial. Se programarán las pausas y los tiempos de utilización en función del equipo seleccionado y del esfuerzo físico requerido para desarrollar la actividad.

La ropa de protección [18] recomendada, si el nanomaterial se encuentra en forma de polvo, será un traje desechable de Tipo 5, con materiales no tejidos como, por ejemplo, el polietileno de alta densidad. No se debe utilizar ropa de protección de algodón, ni mezclas de algodón-poliéster.

La protección de las manos se llevará a cabo con guantes de protección química que se seleccionarán de acuerdo con la naturaleza del nanomaterial y en base a otros agentes químicos que puedan estar presentes. Se recomienda seleccionar guantes de protección de elastómeros como nitrilo, látex, neopreno o butilo.

En el caso de los trabajos en construcción, no hay que olvidar el uso de guantes que proporcionen protección mecánica. Cuando no se encuentren en el mercado guantes que ofrezcan ambas protecciones (química y mecánica), una solución posible sería utilizar los guantes de protección química debajo de los de protección mecánica durante las operaciones con riesgo de exposición a nanomateriales.

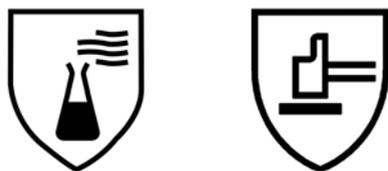


Figura 3. Pictogramas para guantes de protección química y protección mecánica, respectivamente.

## 6. ESTUDIO CUANTITATIVO DE LA EXPOSICIÓN A NANOMATERIALES

A la hora de evaluar el riesgo por exposición a nanomateriales, nos encontramos con varias dificultades, por ejemplo: la identificación de aquellos procesos que pueden producir la liberación del nanomaterial, y que en principio serían los de mayor riesgo de exposición; y, por otro lado, la medición de los niveles de nanomateriales objeto de estudio discriminando de las partículas de fondo.

Hay que conocer qué tipo de nanomaterial puede estar presente en el ambiente laboral ya que puede interferir en las mediciones. Pueden proceder de tres orígenes distintos:

- Partículas de tamaño nanométrico que pueden encontrarse en los lugares de trabajo procedentes del medio ambiente con origen natural o antropogénico, como puede ser la contaminación ambiental.
- Partículas de tamaño nanométrico generadas como subproducto no intencionado de un proceso (nanomateriales incidentales). Pueden producirse en un proceso térmico, mecanizado, por humos de un motor diésel, etc.
- Partículas de tamaño nanométrico que han sido diseñadas de forma intencionada con unas propiedades, dimensiones y formas determinadas y producidas a nivel industrial o en laboratorios de investigación. Se denominan nanomateriales manufacturados o fabricados y son el objeto de esta evaluación.

### 6.1. Objeto

Para poder determinar las exposiciones potenciales a nanomateriales, sus agregados y/o aglomerados en procesos vinculados al sector de la Construcción, se decidió realizar un estudio de la exposición cuantitativa a nanomateriales manufacturados. Para ello, se eligieron tres de los nanomateriales más utilizados en el sector. En concreto, se estudiaron el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y el grafeno.

### 6.2. Alcance

En el estudio realizado se ha decidido caracterizar aquellas actividades del sector de la Construcción en las que se utilizan nanomateriales y en las que hay más probabilidad de liberar nanomateriales manufacturados al ambiente, cubriendo todo el ciclo de vida típico de un nanomaterial aplicado en este sector (ver Figura 4).

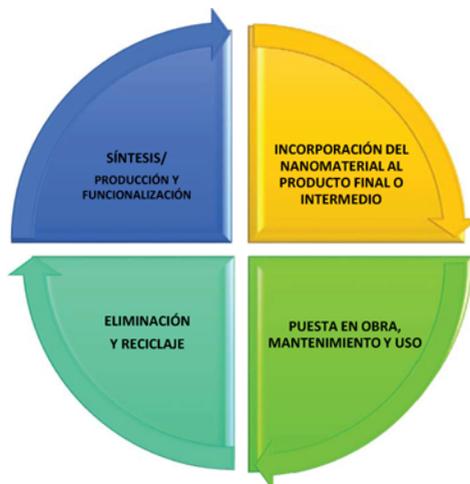


Figura 4. Ciclo de vida de un NM durante un proceso de construcción.

Este ciclo de vida comienza con la síntesis o producción del nanomaterial por medio de diversos métodos físico-químicos, bien con los métodos conocidos como *top-down*, donde se parte de un material de mayor tamaño y mediante desgaste o molienda se reduce su tamaño hasta conseguir partículas de tamaño nanométrico, bien a partir de métodos *bottom-up*, en los se produce un crecimiento de las partículas directamente por medio de nucleación, condensación y/o coagulación del material de partida en fase gaseosa o en fase líquida o coloidal.

Una vez sintetizado el nanomaterial, este puede someterse a operaciones posteriores de purificación, funcionalización o adición de recubrimientos superficiales. A continuación, se puede comercializar como producto para su uso de forma individual o para su utilización como aditivo incorporado en productos finales como son cementos, pinturas, ventanas, etc.

La etapa de puesta en obra implica tareas como la utilización o aplicación de productos que contienen nanomateriales como pinturas y revestimientos, realización de enfoscados y dosificación y preparación de morteros, entre otras. En esta etapa también se incluye el uso durante la vida útil del producto final y las tareas para su mantenimiento.

La última etapa del ciclo de vida es la demolición del producto final que contiene el nanomaterial. Aquí se incluyen tareas como la retirada de revestimientos y las operaciones de corte y lijado. A partir de ahí, se gestionan los residuos, procediéndose a su eliminación o pudiéndose transformar y reciclar en un nuevo material, comenzando así de nuevo el ciclo.

### 6.3. Nanomateriales del estudio

#### ***Dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>)***

El dióxido de titanio se estudió en dos productos finales en los que se encontraba como aditivo:

- El primer producto estudiado fue un cemento, en el cual el nanomaterial aporta características fotocatalíticas, alta resistencia mecánica, endurecimiento rápido, propiedades autolimpiantes, descontaminantes y bacteriostáticas.
- El otro producto estudiado fue una pintura en la que el nanomaterial aporta propiedades fotocatalíticas.

#### ***Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)***

El dióxido de silicio se estudió en dos procesos distintos: producción y empaquetado. Este nanomaterial se utiliza como aditivo en distintos productos finales como, por ejemplo, en:

- cemento y hormigón, aportando propiedades como una mayor resistencia mecánica, reducción de la corrosión y reducción de la permeabilidad al agua;

- materiales cerámicos, aportando propiedades refrigerantes, antirreflejo y resistencia al fuego;
- pinturas, mejorando su adhesión y durabilidad; en ventanas, aportando propiedades ignífugas, resistencia frente al calor o antirreflejos, etc.

### Grafeno

Se estudió una operación de empaquetado de grafeno a escala piloto. Este nanomaterial se utiliza como material de relleno para polímeros conductores por su excelente conductividad eléctrica.

En la Tabla 3 se detallan los procesos en los que se han realizado mediciones:

ETAPA DEL CICLO DE VIDA	PROCESOS	NANOMATERIAL/ PRODUCTO
SÍNTESIS/ PRODUCCIÓN Y FUNCIONALIZACIÓN DEL NANOMATERIAL	Producción de nanomaterial en medio líquido	SiO <sub>2</sub>
	Producción nanomaterial en medio sólido	SiO <sub>2</sub>
	Empaquetado de nanomaterial a escala piloto	Grafeno compacto y Grafeno platelets
	Empaquetado de nanomaterial a escala industrial (en el interior y exterior de nave industrial)	SiO <sub>2</sub>
INCORPORACIÓN DEL NANOMATERIAL AL PRODUCTO INTERMEDIO O FINAL	Elaboración de mortero con cemento con nanomaterial	Cemento con TiO <sub>2</sub>
PUESTA EN OBRA, MANTENIMIENTO Y USO	Enfoscado	Mortero con TiO <sub>2</sub>
	Pinturas aplicadas con rodillo	TiO <sub>2</sub>
	Pinturas aplicadas con pistola	
	Raspado	TiO <sub>2</sub>
	Corte	TiO <sub>2</sub>
ELIMINACIÓN Y RECICLAJE	Retirada material	TiO <sub>2</sub>

Tabla 3. Procesos objeto del estudio en los que se han realizado las mediciones de los nanomateriales.

Uno de los problemas que se va a plantear, una vez realizadas las mediciones de los nanomateriales objeto del estudio, es la dificultad de comparar con valores límite ambientales basados en criterios de salud, puesto que hasta ahora se han establecido solo unos pocos debido a la falta de estudios toxicológicos y epidemiológicos. Para el dióxido de titanio y el dióxido de silicio existen una serie de valores recomendados para exposiciones de 8 horas y, en algunos casos, para exposiciones cortas, que se muestran en la Tabla 4.

	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
Límites de exposición recomendados (REL) propuestos por NIOSH	0,3 mg/m <sup>3</sup>	----
Niveles de exposición de referencia (BEL) propuestos por BSI	20.000 partículas/cm <sup>3</sup> 0,066 x WEL <sup>a</sup>	20.000 partículas/cm <sup>3</sup> 0,066 x WEL <sup>a</sup>
Niveles de referencia recomendados (RBL) propuestos por IFA	40.000 partículas/cm <sup>3</sup>	40.000 partículas/cm <sup>3</sup>
Valores de referencia Nano (NRV) propuestos por SER ( <i>Social and Economic Council of the Netherlands</i> )	40.000 partículas/cm <sup>3</sup> 80.000 <sup>b</sup> partículas/cm <sup>3</sup>	40.000 partículas/cm <sup>3</sup> 80.000 <sup>b</sup> partículas/cm <sup>3</sup>
Límites de exposición laboral (OELs) propuestos por el proyecto Scaffold	0,1 mg/m <sup>3</sup>	0,3 mg/m <sup>3</sup>

<sup>a</sup>WEL – *Workplace exposure limit* (Límite de exposición profesional).

<sup>b</sup>Valores para exposiciones de corta duración.

**Tabla 4.** Valores de exposición recomendados y de referencia.

Como los valores de referencia recomendados por diferentes organizaciones no se pueden aplicar a todos los nanomateriales del estudio y dado que las exposiciones estudiadas son cortas y no se dispone de datos para jornadas de 8 horas, en este estudio se utilizó la comparación del nivel medido durante la tarea con respecto al nivel de fondo para determinar si la exposición era significativa o no y también como criterio para determinar la necesidad de adoptar medidas de control. Se consideró que la exposición era significativa cuando la concentración de nanomateriales durante la actividad superaba tres veces la concentración de partículas nanométricas de fondo [20].

## 6.4. Metodología

La metodología que se ha seguido en el estudio está basada en la estrategia de medición definida en el método NEAT 1.0 (*Nanoparticles Emission Assessment Technique*) de NIOSH [21]. Esta metodología está siendo ampliamente utilizada para este tipo de estudios y consiste en una aproximación escalonada en dos niveles, tal y como se indica en la Figura 5.

El nivel 1 se centra en la identificación de las fuentes potenciales de emisión de nanomateriales y de las tareas. Para ello, se realiza una visita donde se revisa toda

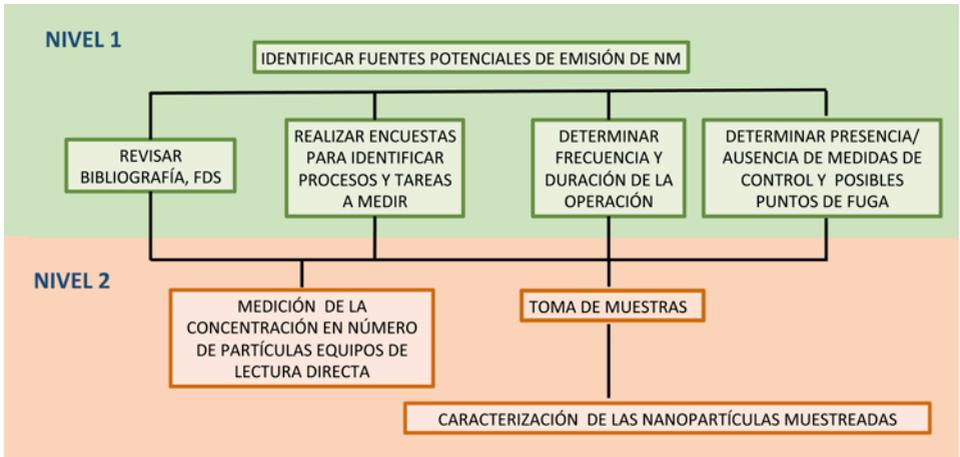


Figura 5. Método NEAT 1.0.

la documentación disponible sobre los nanomateriales utilizados, como bibliografía, fichas de datos de seguridad (FDS) y registro de materias primas. A continuación, se realizan encuestas en el área de producción para identificar los procesos y tareas a medir y se obtiene información sobre:

- tipo de proceso,
- zonas de entrada y descarga de los materiales,
- procedimientos de trabajo,
- frecuencia y duración de las tareas,
- tipo de equipo utilizado,
- puntos en los que se libera nanomaterial al ambiente de forma intencionada (como la apertura de un equipo para su limpieza),
- presencia o ausencia de medidas de control implantadas y de posibles puntos del sistema que pueden estar defectuosos o producir una posible fuga, como las juntas de sellado.

Una vez analizada la información recogida en el nivel 1, si se determina que existe o puede existir liberación de nanomaterial, se pasará al nivel 2 para proceder a medir los nanomateriales en las tareas donde se presupone la exposición.

Antes de realizar las mediciones de los nanomateriales objeto de estudio debemos conocer el nivel de fondo, lo que dará una idea general de la concentración de partículas de tamaño nanométrico que hay en suspensión en el ambiente de trabajo y que pueden proceder de la contaminación ambiental o de otras operaciones de la empresa pero que, en definitiva, no proceden de la tarea que se quiere evaluar con

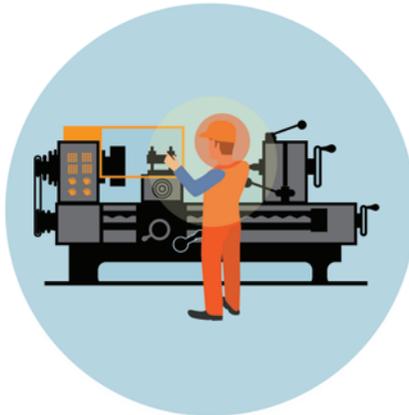
los nanomateriales manufacturados. Hay que tener en cuenta que siempre habrá una incertidumbre en la medida del fondo, puesto que las partículas procedentes de la contaminación ambiental no se mantienen constantes ni en una jornada laboral ni en los días sucesivos, sino que existen numerosos factores como la humedad, temperatura, velocidad y dirección del viento, etc., que van a condicionar los niveles de material particulado presente en el ambiente.

Si como resultado de la medición del fondo se obtiene una concentración alta<sup>1</sup>, se deberá determinar el origen, pudiendo proceder de bombas de vacío, unidades de calefacción por gas, gasolina, propano, diésel, soldadura, etc. Además, deberá repetirse la medición de fondo después del cese de la actividad.

Posteriormente, se medirá la concentración de nanomateriales en la tarea seleccionada. Para poder estudiar la propagación de la nanopartículas en el lugar de trabajo se realizarán mediciones en dos zonas diferentes (ver Figura 6):

- una, en el campo cercano, que comprende entre 0,5 y 1 m de la zona de actividad, y
- otra, en el campo lejano, a más de 2 metros de la zona de actividad.

Para una mayor precisión de la exposición, se mide en la zona de respiración del trabajador, en torno a 30 cm de las vías respiratorias.



**Figura 6.** Zonas de medición  
(azul: campo lejano; amarillo: campo cercano; rojo: zona de respiración).

<sup>1</sup> De acuerdo con distintos estudios realizados los valores de fondo por debajo de 15.000 partículas/cm<sup>3</sup> se han considerado como valores normales [14].

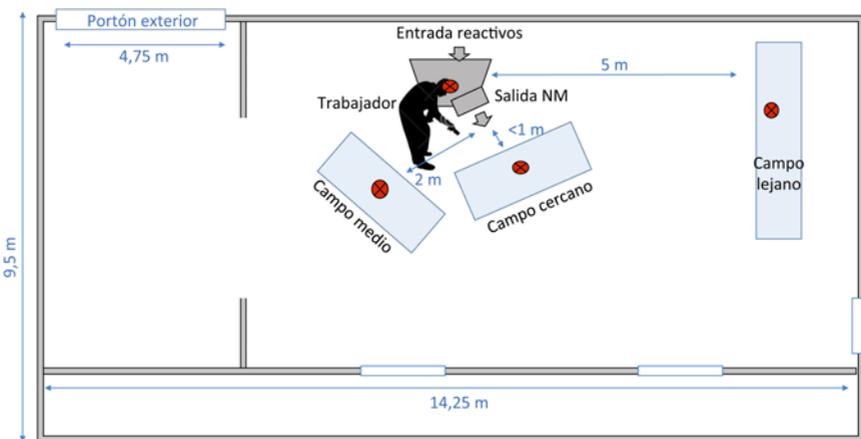
## 6.5. Descripción de los procesos (escenarios de exposición)

A continuación, se describen los distintos procesos que se han estudiado dentro de cada una de las etapas del ciclo de vida del NM (en concordancia con lo reflejado en la Tabla 3) incluyendo las características de los escenarios, los procesos evaluados y la existencia o no de medidas de control.

### **PROCESO 1: Producción de $\text{SiO}_2$ en medio líquido**

Las nanopartículas de  $\text{SiO}_2$  se presentan en forma esférica, con un tamaño comprendido entre los 20-30 nm, en forma de polvo, y están contenidas en sacos de 5 kg. Para su producción se utiliza un agente de acoplamiento en fase húmeda. El proceso comienza cuando un trabajador, ayudado de una escalera de mano, echa un saco en la mezcladora y, a continuación, otro trabajador añade un litro del agente de acoplamiento y cierra la mezcladora. Después de la agitación, durante unos dos minutos, el producto final se vierte en un saco de plástico por una canaleta. Esta operación se repitió tres veces. Finalmente, se procede a la recogida de los restos de material que hayan caído al suelo ( $\text{SiO}_2$  funcionalizado). Por último, se abrió el portón exterior y se limpió una zona con aspiradora industrial en seco sin filtros adecuados para captar nanomateriales. Para la realización de este proceso no se dispone de ninguna extracción localizada y se cuenta únicamente con ventilación natural a través de un portón de salida.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo (mezcladora) se muestra en el Esquema 1.

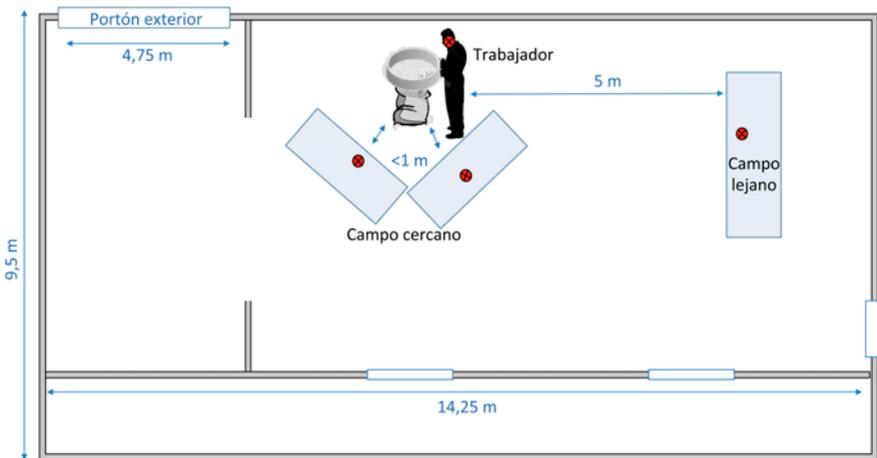


Esquema 1. Situación de los equipos de medida en la producción de  $\text{SiO}_2$  en medio líquido.

### PROCESO 2: Producción de $\text{SiO}_2$ en medio sólido

La tarea, análoga a la descrita en el proceso 1, es realizada por dos trabajadores. El  $\text{SiO}_2$ , de unos 20-30 nm, se encuentra en polvo, en sacos de 5 kg, se añade 1 kg del agente agregante en la mezcladora. Se repite el proceso 3 veces. El producto se recoge en sacos. Al final se limpia el suelo mediante barrido en seco y con una aspiradora en seco. En este caso, como el producto requiere ser tamizado, un trabajador vierte el  $\text{SiO}_2$  funcionalizado en la tamizadora, mientras que el otro trabajador recoge el producto ya tamizado, que sale a través de una canaleta en otra bolsa. Por último, se desmonta de la tamizadora, se realiza el barrido en seco y se vuelve a aspirar. Como en el caso anterior, no se dispone de ninguna extracción localizada y se cuenta únicamente con ventilación natural a través de un portón de salida.

La situación de los equipos de medida con respecto al equipo de trabajo (tamizadora) se muestra en el Esquema 2.



Esquema 2. Situación de los equipos de medida en la producción de  $\text{SiO}_2$  en medio sólido.

### PROCESO 3: Empaquetado y pesada a escala piloto de grafeno

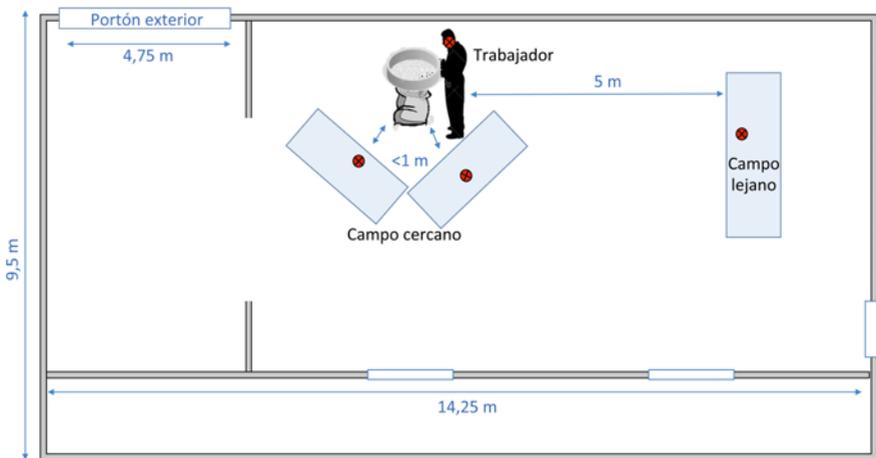
En un laboratorio de pruebas se estudia una operación de empaquetado de grafeno. La operación se realiza entre dos trabajadores, de tal forma que el primero de ellos sujeta la bolsa que hay que llenar sobre una balanza y el segundo vacía directamente sobre la misma el contenido de la bolsa de partida con el material. El ajuste al peso deseado (1 kg) se realiza con una pala de mano y, cuando se ha alcanzado, se cierra la bolsa con una cinta adhesiva y se almacena.

La operación se ha llevado a cabo con dos tipos de grafeno:

- Grafeno compacto o *few-layer*, que son láminas de entre 40-70  $\mu\text{m}$  de tamaño lateral y entre 3-5 nm de grosor (presentado en bolsas de menos de 100 g cerradas herméticamente). En total se volcaron 24 bolsas pequeñas en los 30 minutos que duró la operación.
- Grafeno platelets, de entre 20-40  $\mu\text{m}$  de tamaño lateral y unos 100 nm de grosor (presentado en bolsas de más de 1 kg). En total se embolsaron 15 bolsas en 30 minutos que duró la operación.

Para la realización de este proceso no se dispone de ninguna extracción localizada y se cuenta únicamente con ventilación natural a través de un portón de salida que se abre únicamente después de la pesada y el empaquetado, durante la limpieza posterior.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 3.



Esquema 3. Situación de los equipos de medida en el empaquetado de grafeno a escala piloto.

#### **PROCESO 4: Empaquetado a escala industrial**

El estudio del proceso de empaquetado a escala industrial se ha realizado en dos escenarios diferentes: el primero de ellos (a) en el interior de una nave industrial y en el segundo (b) en el exterior de la misma, siendo los productos empaquetados diferentes en cada caso.

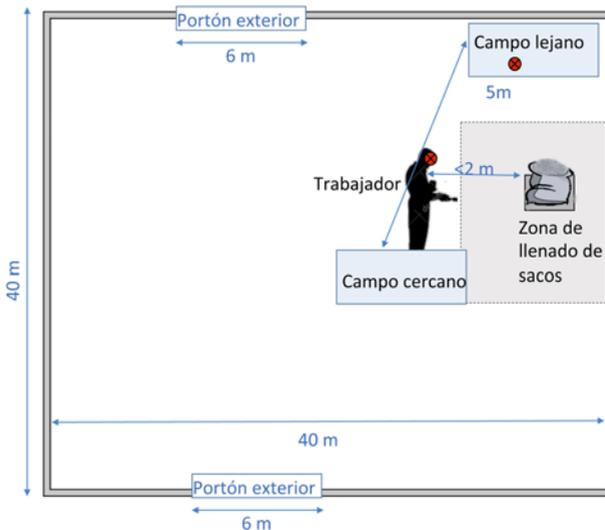
a. **Empaquetado a escala industrial, en el interior de una nave, de:**

**Mortero con nano  $\text{TiO}_2$ :** El trabajador apila los sacos de cartón para que la máquina vaya cogiéndolos y acercándolos al tubo de llenado de producto, el mortero, que baja a través de unos conductos hasta las bocas de llenado para su empaquetado. Una vez lleno, el saco cae a una cinta transportadora. La distancia del trabajador con respecto al foco emisor del producto es considerable, de aproximadamente dos metros.

La tarea está prácticamente automatizada y el trabajador sólo vuelve a intervenir si no se llena correctamente el saco. Entonces accede a la zona de descarga del nanomaterial, realizando acciones como pinchar el saco con un dispositivo punzante desde la plataforma de trabajo, acercarse a la zona del tubo de llenado para intentar solucionar el problema o golpear con una maza el tubo. En esta tarea el trabajador también recoge muestras del producto por lotes.

Para la realización de esta tarea se dispone de una ventilación localizada situada en varios puntos: en la boca de salida del producto, por debajo del saco que se llena y por debajo de la plataforma de trabajo. Además, se complementa con ventilación natural a través de los portones y ventanas de la nave.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 4.



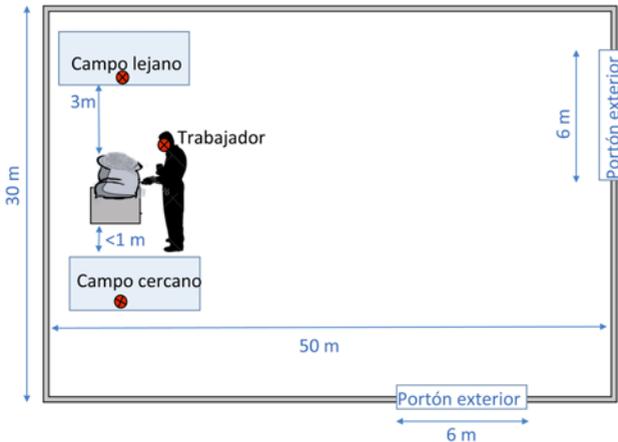
Zonas de medida (marcadas como ●)

Esquema 4. Situación de los equipos de medida en el empaquetado a escala industrial de mortero de nano  $\text{TiO}_2$  en el interior de una nave industrial.

**SiO<sub>2</sub> en sacos de 20 kg:** El trabajador coloca un saco de cartón vacío y abierto en la boca de entrada del producto. A continuación, cae el producto a empaquetar en el saco hasta que se alcanza el peso final. Una vez lleno, cae a una cinta transportadora.

Se cuenta con ventilación natural a través de unos portones que se abrían y cerraban en función del paso de carretillas o personas, y con extracción localizada con tres puntos de aspiración: por debajo, detrás del saco (a la altura de las manos del trabajador) y un tercer punto que era una manguera libre usada para limpiar la zona tras el uso.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 5.

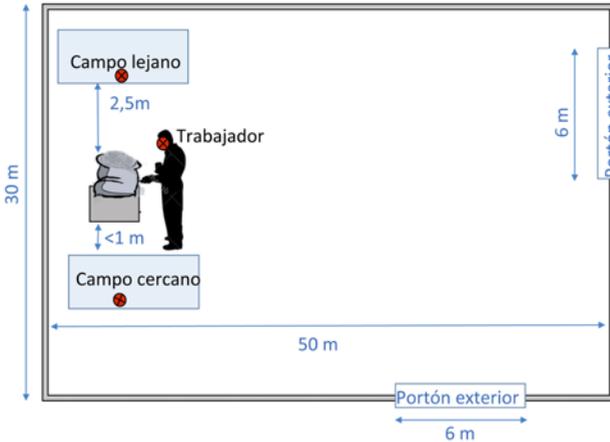


Esquema 5. Situación de los equipos de medida en el empaquetado a escala industrial de SiO<sub>2</sub> (sacos de 20 kg) en el interior de una nave industrial.

**SiO<sub>2</sub> en sacos de 25 kg:** El trabajador coloca un saco de cartón vacío y abierto en la boca de salida por la que cae el producto a empaquetar. Se rellena el saco y, una vez se alcanza el peso final, el trabajador hace un doblez de cierre y lo mueve hacia una plataforma abatible, por donde el saco cae a una cinta transportadora.

Se dispone de ventilación natural y de un sistema de aspiración por debajo del área de llenado.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 6.



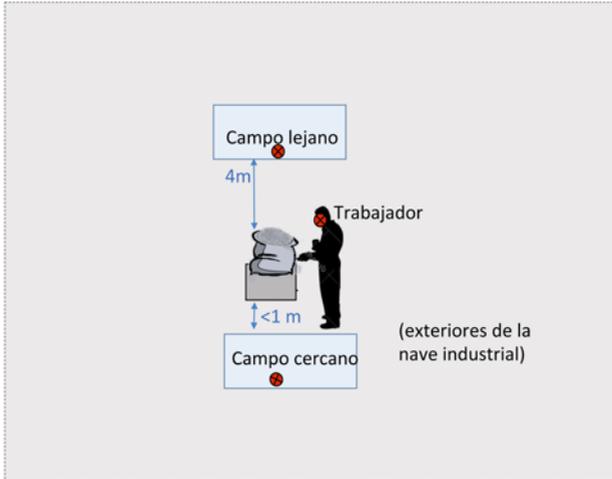
Esquema 6. Situación de los equipos de medida en el empaquetado a escala industrial de  $\text{SiO}_2$  (sacos de 25 kg) en el interior de una nave industrial.

### b. Empaquetado a escala industrial en el exterior:

Esta operación se realiza mediante la descarga por gravedad (desde una altura máxima de 2 metros) del producto que está almacenado en silos de gran volumen, a través de un tubo que conecta con los sacos GRG (Gran Recipiente a Granel) de 500 kg. El trabajador está en una plataforma controlando el peso a través de una consola y agarrando el embudo que tiene el GRG para evitar la fuga de material. Durante el proceso tiene que golpear con un mazo la tubería debido a que el producto se queda atascado a veces. También durante el proceso recoge muestras. Una vez pesa los 500 kg, el trabajador baja de la plataforma, toma una carretilla para retirar el GRG y colocar otro vacío en su lugar.

Al ser una tarea que se realiza en el exterior, en abierto, un factor a considerar son las condiciones climatológicas, fundamentalmente, la dirección del viento. Por otra parte, existen simultáneamente otros procesos que pueden afectar también a los resultados de las medidas, como el paso de camiones para la recogida y transporte del producto empaquetado.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 7.



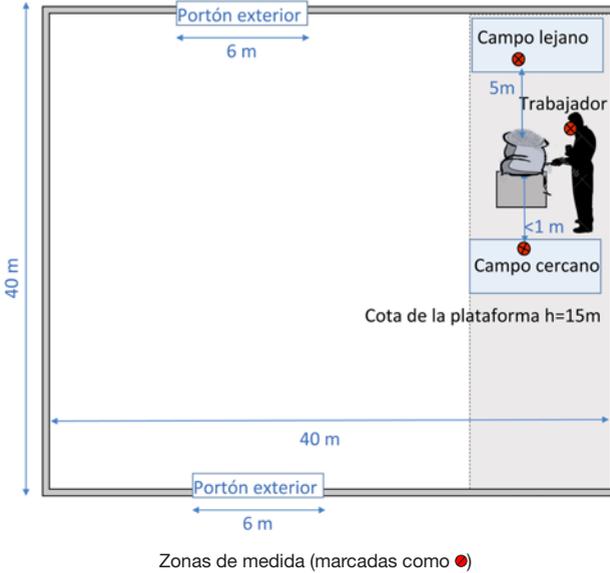
Esquema 7. Situación de los equipos de medida en el empaquetado de  $\text{SiO}_2$  a escala industrial en el exterior.

### **PROCESO 5: Elaboración de mortero con cemento con nano- $\text{TiO}_2$**

En una nave industrial se estudia un proceso de aditivación de un mortero con cemento que contiene nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  al 1,5% de concentración (máximo). La tarea se desarrolla en una plataforma metálica, a unos 15 m de altura, de tal forma que el trabajador coge el saco de cemento con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , lo apoya en el borde de una tolva, lo raja y vierte el producto. Cuando termina de volcarlo, tapa la entrada de la tolva. Se dispone de una extracción localizada y, además, de ventilación natural por los portones y ventanas de la nave.

Hay que tener en cuenta que en la nave hay actividad continua mientras se realizan las mediciones objeto del estudio y que, además, circulan vehículos a motor.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo (mezcladora) se muestra en el Esquema 8.



Esquema 8. Situación de los equipos de medida durante la elaboración de mortero con cemento con nano-TiO<sub>2</sub>.

### PROCESO 6: Enfoscado

El proceso de enfoscado se realizó en una planta piloto con un mortero de albañilería sin nanomateriales y con un mortero de revestimiento fotocatalítico que contenía TiO<sub>2</sub> nanométrico al 1-1,5%. El portón de entrada a la planta piloto permaneció abierto durante las mediciones.

El trabajador abre el saco de mortero y vierte el contenido en un recipiente. Posteriormente, le añade agua y procede a la homogeneización de la mezcla con una paleta. Una vez obtenida la consistencia necesaria, se aplica en la pared con la ayuda de una llana. Se dispone de ventilación natural.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 9.



Zonas de medida (marcadas como ●)

Esquema 9. Situación de los equipos de medida durante el enfoscado con mortero de albañilería.

## PROCESO 7: Aplicación de pintura con rodillo y con pistola

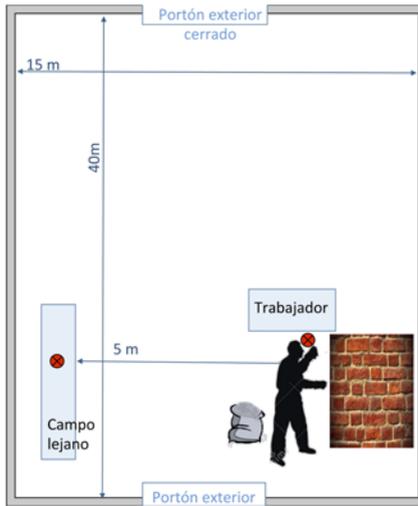
### Pinturas y recubrimientos

En este apartado se estudia la exposición potencial durante la aplicación de diferentes pinturas mediante dos mecanismos de aplicación: con rodillo y con pistola. A continuación se describen los tres tipos de pinturas aplicadas.

- Pintura plástica mate.
- Pintura fotocatalítica con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (1,5% concentración máxima).
- Pintura con una imprimación de nano  $\text{TiO}_2$  (1,5% concentración máxima).

El proceso de aplicación de pinturas y recubrimientos se ha realizado en una planta piloto. El portón de entrada a la planta permaneció abierto durante las mediciones.

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 10.



Esquema 10. Situación de los equipos de medida durante la aplicación de pintura, raspado, lijado, corte con radial portátil y demolición.

### **PROCESO 8: Operaciones de raspado y lijado**

La operación, realizada en una planta piloto, consistió en el raspado con llana de dientes y con lija de pintura plástica mate aplicada mediante rodillo sobre una pared revestida con mortero de albañilería. También se realizó el lijado de pintura fotocatalítica con nano  $\text{TiO}_2$  (<5%) mate de interior al agua, aplicada con pistola sobre pared revestida con mortero.

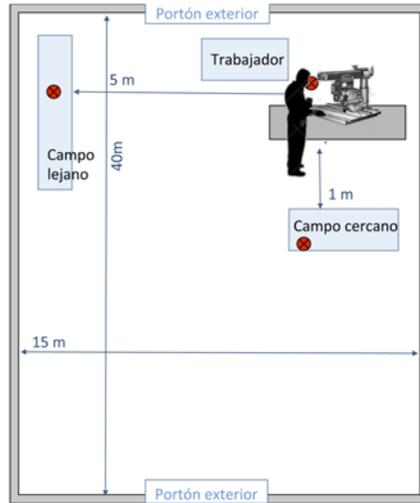
La situación de los equipos de medida es la que se muestra en el Esquema 10.

### **PROCESO 9: Operaciones de corte con radial**

En lo que se refiere al corte de diferentes materiales, se procedió a estudiar, en una planta piloto, una operación de corte con radial portátil y con sierra radial fija, esta última en seco y en húmedo.

Con radial de mano se realizó al corte de mortero de albañilería, de mortero fotocatalítico con NMs, de mortero fotocatalítico revestido con una imprimación fotocatalítica ambos productos con NMs, y un mortero de albañilería revestido con una imprimación fotocatalítica, con NMs.

La situación de los equipos de medida es la que se muestra en el Esquema 10 para el corte con radial portátil y en el Esquema 11 para el corte con radial fija.



Esquema 11. Situación de los equipos de medida durante el proceso de corte con radial fija.

### PROCESO 10: Retirada de material

El último proceso estudiado coincide con el fin del ciclo de vida de un nanomaterial y es la retirada del material o demolición. En este caso el trabajador, con la ayuda de un martillo, golpea repetida y enérgicamente, en primer lugar, una pared cubierta con mortero modificado con nano  $\text{TiO}_2$  (<5%), en segundo lugar, una pared cubierta con mortero modificado con nano  $\text{TiO}_2$  (<5%) con imprimación fotocatalítica con nano  $\text{TiO}_2$  (<5%) y, en tercer lugar, una pared cubierta con mortero de albañilería con imprimación fotocatalítica con nano  $\text{TiO}_2$  (<5%).

La situación de los equipos de medida con respecto a los equipos de trabajo se muestra en el Esquema 10.

### 6.6. Equipos de medida

Para realizar la evaluación de la exposición por inhalación a agentes químicos se mide de forma habitual la masa de agente químico por unidad de volumen. Sin embargo, existen estudios que ponen de manifiesto que la masa no es una medida adecuada para evaluar la exposición a nanomateriales, siendo el área superficial y el número de partículas los mejores indicadores hasta el momento. El método NEAT apuesta por equipos que miden el número de partículas, por ello, en este estudio se utilizaron los equipos de lectura

directa como el CPC y OPS, que proporcionan datos (concentración en número de partículas) en el momento de la medida sin necesidad de etapas posteriores de análisis.

Estos equipos presentan un corte superior de tamaño de partículas en torno a la micra o tamaños inferiores, lo que supone que las partículas que van a detectar mejor son las que presentan geometrías más simples, como puede ser una esfera, mientras que las formas laminares o fibrosas serán detectadas de forma menos precisa. Por ello cabe esperar que se obtendrán mejores resultados para el dióxido de titanio y el dióxido de silicio que para el grafeno.

Además, ya que los anteriores equipos no distinguen el origen de las nanomateriales, las mediciones se complementaron con un estudio cualitativo de las nanopartículas existentes en el lugar de trabajo, para lo cual se tomaron muestras mediante filtros de fibra de vidrio, conectados a unas bombas de aire y se analizaron posteriormente por microscopía electrónica de barrido (SEM).

En la Tabla 4 se detallan los equipos de lectura directa utilizados en las mediciones, incluyendo el parámetro de medida y el intervalo de medida en el que trabaja.

INSTRUMENTO	PARÁMETRO DE MEDIDA	RANGO DE TAMAÑO
Contador de partículas por condensación <i>(Condensation Particle Counter)</i> CPC (TSI 3007) 	Número de partículas	10-1000 nm
Clasificador de partículas óptico <i>(Optical Particle Sizer)</i> OPS (TSI 3330) 	Distribución de tamaño en número	300 – 10000 nm
Clasificador de barrido de las partículas por movilidad <i>(Scanning Mobility Particle Sizer)</i> Nanoscan SMPS (TSI 3910) 	Distribución de tamaño en número	10 - 420 nm

INSTRUMENTO	PARÁMETRO DE MEDIDA	RANGO DE TAMAÑO
Cargador por difusión ( <i>Diffusion Size Classifier miniature</i> ) DiSCmini – TESTO 	Área superficial de las partículas depositadas en la zona alveolar	10- 700 nm
Clasificador de barrido de las partículas por movilidad ( <i>Scanning Mobility Particle Sizer</i> ) SMPS (TSI 3936) + CPC (TSI 3776) 	Distribución de tamaño en número	2,5 – 1000 nm
Contador de partículas ( <i>Particle Counter</i> ) Aerotrak (TSI 9310) 	Número de partículas	300- 25000 nm
<i>DustTrak™ II Aerosol Monitor</i> (TSI 8532) 	Masa	0,001 - 150 mg/m <sup>3</sup>

Tabla 4. Equipos utilizados para cuantificar las partículas presentes en el aire.

## 6.7. Procedimiento de medida

Una vez identificados los escenarios críticos, de acuerdo con el nivel 1 del método NEAT 1.0, se procedió a realizar las mediciones.

Siempre que fue posible, en cada escenario se midió con varios equipos utilizando sondas para captar las nanopartículas lo más cerca posible de la zona de respiración del trabajador. Los equipos se situaron de la forma más adecuada teniendo en cuenta que, en ningún caso, se entorpeciese al trabajador ni su tarea.

La mayoría de las tareas en las que se ha realizado la medición son de corta duración, por debajo de los 30 min. y en ocasiones no superando los 5 minutos, por lo que a la hora de analizar los resultados obtenidos sobre las concentraciones habrá que tener en cuenta que son representativos de periodos de exposición cortos y no de una jornada laboral completa.

En la Figura 7 se puede ver un ejemplo de la medición en una tarea de vertido de un producto en la tolva. En la parte derecha de la imagen se representa el esquema de la tarea, en donde se puede observar la ubicación de los equipos de medición, en campo cercano, lejano o en la zona de respiración del trabajador. También se han tenido en cuenta las medidas de control o la existencia de puertas o ventanas próximas a las zonas de medida.



Imagen del vertido del cemento en la tolva.

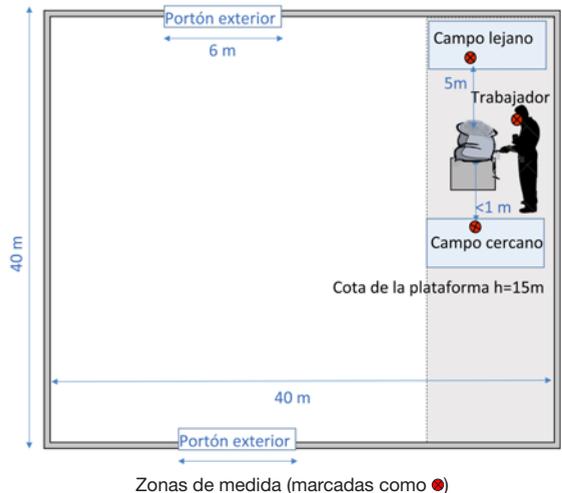


Figura 7. Tarea de vertido en tolva y situación de los equipos de medición.

## 6.8. Resultados

Tras realizar el análisis de los datos obtenidos a través de las mediciones, se han conseguido determinar niveles de concentración de NM en diferentes unidades de medida: partículas/cm<sup>3</sup>, mg/cm<sup>3</sup>, distribución por tamaños y área superficial (μg<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>) de partículas depositadas en las regiones traqueo-bronquial y alveolar del pulmón.

Por otra parte, del análisis de los filtros de captación mediante técnicas de microscopía electrónica (SEM) y espectrometría de rayos X de energía dispersiva (EDX) se ha podido obtener información sobre la naturaleza química y morfología de las partículas.

En la Tabla 5 se recogen los datos de las mediciones realizadas en cada uno de los escenarios de exposición.

ETAPA CICLO DE VIDA	PROCESO		CONCENTRACIÓN N° partículas/cm <sup>3</sup>			RATIO Actividad/ Fondo <sup>1</sup>	Dpg <sup>2</sup> (nm)
			MEDIA	MÁXIMO	MÍNIMO		
SÍNTESIS/PRODUCCIÓN Y FUNCIONALIZACIÓN DEL NM	PROCESO 1. PRODUCCIÓN DE SiO <sub>2</sub> EN MEDIO LÍQUIDO	Fondo	3900 ± 384	4995	3500	-	16,7; 70,1
		Volcado de materiales en mezcladora	6019 ± 2349	11237	3500	1,5 (2,9)	146,5 ± 13,4
		Descarga de NM funcionalizado					
		Limpieza	8321 ± 5370	32983	4387	2,4 (8,6)	174,4
	PROCESO 2. PRODUCCIÓN DE SiO <sub>2</sub> EN MEDIO SÓLIDO	Fondo	10237 ± 1620	19325	46	-	25; 107
		Volcado de materiales en mezcladora	14062 ± 4022	21500	10000	1,4 (2,2)	42; 110
		Descarga de NM funcionalizado					
		Limpieza	10400 ± 6400	34500	5170	2 (6,7)	22; 58; 108
		Fondo	5570 ± 372	6100	4964	-	30; 105
		Tamizado de NM	7946 ± 4114	21800	4580	2 (2,9)	20; 50; 110
		Limpieza	12260 ± 5530	28911	6210	1,6 (4,8)	10; 55; 108
	PROCESO 3. EMPAQUETADO Y PESADA A ESCALA PILOTO DE GRAFENO	Fondo	5700 ± 720	6728	4484	-	42 ± 2,3
		Pesada y empaquetado de grafeno compacto	6610 ± 951	13800	500	1,2 (1,9)	43,4 ± 9,6
		Ventilación y limpieza de la zona (Grafeno compacto)					
		Pesada y empaquetado de grafeno platelets	29165 ± 12211	50672	6562	5,1 (8,9)	32,1 ± 1,8
		Ventilación y limpieza de la zona (Grafeno platelets)	12680 ± 5211	20379	5795	2,2 (3,6)	40; 65
	PROCESO 4. EMPAQUETADO A ESCALA INDUSTRIAL	Fondo	9041 ± 1693	12683	4595	-	15; 30; 105
		Empaquetado a escala industrial de mortero con nano TiO <sub>2</sub>	57710 ± 57926	208715 (fuera de rango de medida del equipo)	100		43
		Empaquetado automático a escala industrial en interior de sacos de 20 kg de SiO <sub>2</sub>	29816 ± 12306	62547	18783	3,3 (6,9)	23; 188

ETAPA CICLO DE VIDA	PROCESO		CONCENTRACIÓN N° partículas/cm <sup>3</sup>			RATIO Actividad/ Fondo <sup>1</sup>	Dpg <sup>2</sup> (nm)
			MEDIA	MÁXIMO	MÍNIMO		
SÍNTESIS/PRODUCCIÓN Y FUNCIONALIZACIÓN DEL NM	PROCESO 4. EMPAQUETADO A ESCALA INDUSTRIAL	Empaquetado semiautomático a escala industrial en interior de sacos de 25 kg de SiO <sub>2</sub>	26874 ± 13750	84000	15400	3 (9,3)	18; 210
		Fondo	24191 ± 26988	257278 (fuera de rango de medida del equipo)	5104	-	8,5 11 14 21 24 48
		Empaquetado a escala industrial de SiO <sub>2</sub> en exterior mediante descarga en sacos de 500 kg	12176 ± 11771	184545 (fuera de rango de medida del equipo)	2575	0,5 (7,6)	12 38 87
INCORPORACIÓN DEL NM AL PRODUCTO INTERMEDIO O FINAL	PROCESO 5. ELABORACIÓN DE MORTERO	Fondo	22581 ± 14177	73386	11552	-	88
		Elaboración de mortero con cemento con nanoTiO <sub>2</sub>	23023 ± 10081	66924	13314	1 (3)	12 65,3 ± 14
PUESTA EN OBRA, MANTENIMIENTO Y USO	PROCESO 6. ENFOSCADO	Fondo	12400±400				
		Amasado de mortero de albañilería con agua	15000±1000	19750	12430	1,3 (1,6)	35±2
		Aplicación del mortero en pared	14200±400	15200	13200	1 (1,1)	35±2
		Amasado mortero con nano TiO <sub>2</sub>	20000±3000	45500	17650	1,1 (1,8; hasta 13)	60±2
		Aplicación mortero con nano TiO <sub>2</sub>	19000±400	19200	17800	1,1 (1,2)	68±8
	PROCESO 7. APLICACIÓN DE PINTURA CON RODILLO Y PISTOLA	Fondo	7200±600				
		Aplicación de pintura plástica con rodillo	8900±700	11020	7330	1,2 (1,5)	61±2
		Fondo	8000±900				
		Aplicación de pintura fotocatalítica con NMS mediante rodillo	9000±1000	12420	8725	1,1 (1,6)	39±2
		Fondo	6630±180				
		Aplicación de recubrimiento fotocatalítico con rodillo	10000±300	10035	9620	1,5 (1,5)	69±2
		Fondo	7000±180				
		Esprayado de pintura plástica	8700±600	11300	6700	1,2 (1,6)	60±2
		Fondo	11000±2000				
		Esprayado de pintura fotocatalítica con NMS	16000±5000	35400	8600	1,5 (3,2)	60±2
Fondo	12400±700						
Esprayado de recubrimiento fotocatalítico	50000±30000	147400 (fuera de rango de medida del equipo)	12280	4,1 (12)	65±2		

ETAPA CICLO DE VIDA	PROCESO		CONCENTRACIÓN N° partículas/cm <sup>3</sup>			RATIO Actividad/ Fondo <sup>1</sup>	Dpg <sup>2</sup> (nm)
			MEDIA	MÁXIMO	MÍNIMO		
PUESTA EN OBRA, MANTENIMIENTO Y USO	PROCESO 8. OPERACIONES DE RASPADO Y LIJADO	Raspado de pintura plástica	18300±1300	27400	15600	1,2 (1,8)	60±2
		Lijado de pintura plástica	8500±300	10248	8230	1,3 (1,6)	80±2
		Lijado de pintura fotocatalítica con NM	8600±300	10200	6200	1,4 (1,6)	60±2
	PROCESO 9. OPERACIONES DE CORTE CON RADIAL	Corte con radial portátil de una pared enfoscada con mortero de albañilería	11000±13000	154000 (fuera de rango de medida del equipo)	6300	1,7 (2,4)	120±2
		Corte con radial portátil de una pared enfoscada con mortero fotocatalítico con NM	13300±1900	19750	9500	1,8 (2,6)	63±2
		Corte con radial portátil de una pared enfoscada con mortero fotocatalítico con NM con imprimación fotocatalítica con NM	40000±15000	59300	8650	3,4 (5,1)	64±2
		Corte con radial portátil de una pared enfoscada con mortero de albañilería con imprimación fotocatalítica con NM	15000±3000	161000 (fuera de rango de medida del equipo)	12000	1,2 (1,3)	96±2
		Corte en seco con radial fija de una pared enfoscada con mortero de albañilería	4240 ± 440	11377	3313	1,3 (3,4)	87 ± 36
		Corte en húmedo con radial fija de una pared enfoscada con mortero de albañilería					
		Corte en seco con radial fija de una pared enfoscada con mortero con NM	5110 ± 4239	83490	3312	1,6 (2,6)	92 ± 28
		Corte en húmedo con radial fija de una pared enfoscada con mortero con NM					
ELIMINACIÓN Y RECICLAJE	PROCESO 10. RETIRADA DE MATERIAL	Retirada de enfoscado de mortero fotocatalítico con NM	8900±300	9400	7250	1,2 (1,3)	85±2
		Retirada de enfoscado de mortero fotocatalítico con NM con imprimación fotocatalítica con NM	9400±170	9650	9350	1 (1)	90±3
		Retirada de enfoscado de mortero de albañilería con imprimación fotocatalítica con NM	8600±300	11000	7850	1,1 (1,4)	98±2

<sup>1</sup> Entre paréntesis, el máximo alcanzado.

<sup>2</sup> Dpg: Diámetro Geométrico Medio. Se ha obtenido del ajuste de los datos del SMPS y OPS. Se muestra el tamaño estimado del pico principal en negrita, y de los secundarios si los hubiera.

Tabla 5. Resultados de las mediciones en los distintos procesos.

## PROCESO 1: Producción de nano-SiO<sub>2</sub> en medio líquido

El nivel de fondo registrado antes de comenzar el proceso es de 3.900 partículas/cm<sup>3</sup> aproximadamente. Cuando comienza el proceso de carga de material en el reactor, se detectan únicamente variaciones de concentración en el campo cercano (*near field*) del trabajador (registradas por el SMPS). En cada descarga de material se produce un pico de concentración, que se corresponde con liberación al ambiente del NM que se acumula con la siguiente carga y posterior descarga, alcanzando una concentración de en torno a 15.000 partículas/cm<sup>3</sup> (aproximadamente, 4 veces superior a la concentración del nivel de fondo).

Durante las tareas de limpieza y ventilación natural, la concentración sigue aumentando mientras se recoge el material y los útiles en torno a la maquinaria y se abren puertas al exterior para ventilar la zona. Posiblemente, el paso de los trabajadores y de las corrientes de aire generadas resuspendiesen partículas ya depositadas, alcanzando picos de concentración tan altos como 30.000 partículas/cm<sup>3</sup>, que rápidamente decaen a valores cercanos a los iniciales del nivel de fondo pasado un tiempo. En la Figura 8 se puede observar la concentración ambiental de partículas por debajo de 1 µm recogida con los CPCs (línea amarilla y roja), así como por debajo de 300 nm con el SMPS (línea verde).

En cuanto al tamaño de las partículas liberadas al ambiente durante el proceso, se obtiene un tamaño medio de  $146,5 \pm 13,4$  nm, lo que indica la presencia de aglomerados de las partículas liberadas y de otras de mayor tamaño, comprobando además la diferencia con los tamaños detectados en el nivel de fondo. Debido a la alta humedad del proceso (se produce en un medio líquido), cabe esperar una alta aglomeración del material, como se confirma en las imágenes captadas mediante microscopía electrónica SEM (Figura 8).

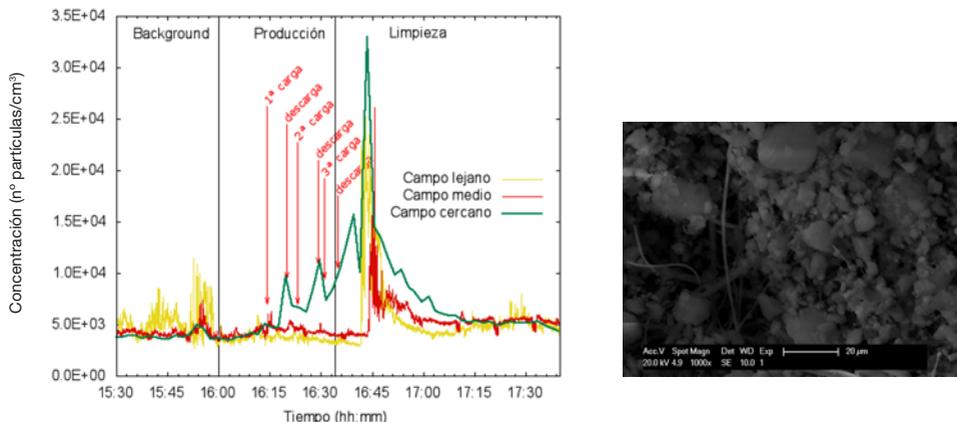


Figura 8. Resultados de las mediciones realizadas en la síntesis de NM en medio líquido (izquierda) e imagen mediante microscopía SEM (derecha).

## PROCESO 2: Producción de nano-SiO<sub>2</sub> en medio sólido

Se parte de un nivel de fondo de 10.000 partículas/cm<sup>3</sup>. Se realizaron tres cargas y descargas de material, registrándose en cada operación un aumento de la concentración hasta las 21.500 partículas/cm<sup>3</sup> en cada descarga (ver Figura 9). Estos picos de concentración fueron registrados por el SMPS en el campo cercano.

Al finalizar el proceso de producción de SiO<sub>2</sub>, se procedió a recoger, limpiar y ventilar la zona. En este caso, se utilizó primero un barrido y después una aspiración para limpiar los restos de polvo que habían caído en el suelo. Se observa un drástico incremento de la concentración hasta valores de 46.000 partículas/cm<sup>3</sup> a todas las distancias medidas (campo cercano, medio o lejano), aunque en el campo lejano es donde primero se observa el descenso tras su uso (ver Figura 9).

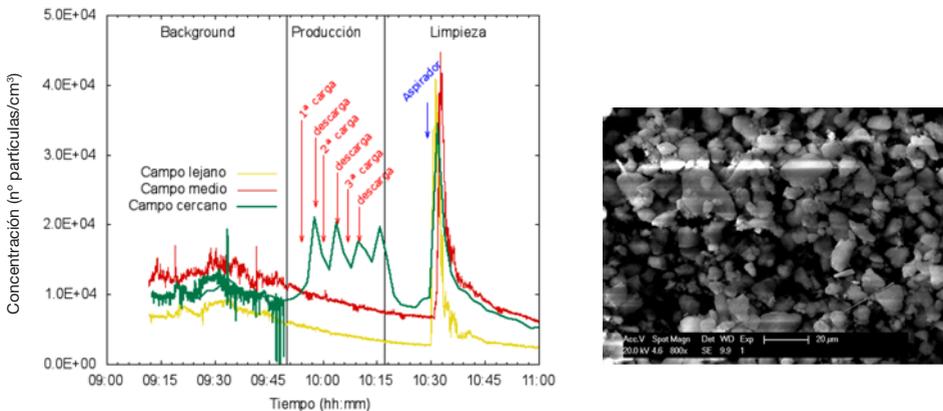


Figura 9. Resultados de las mediciones realizadas en la producción de nanomateriales de SiO<sub>2</sub> en medio sólido (izquierda) e imagen mediante microscopía SEM (derecha).

En cuanto al tamaño de las partículas liberadas al ambiente durante el proceso, se observa que pasan de un tamaño en torno a los 25 nm a tamaños por encima de 100 nm durante el proceso, aunque manteniéndose un amplio rango de partículas en torno a los 40 nm. Esta curva secundaria vuelve a disgregarse durante la limpieza en dos picos predominantes en torno a los 20 y 60 nm.

Del análisis por microscopía SEM se detectan cantidades altas de silicio, en el proceso de producción de SiO<sub>2</sub> más sólido y se observa que las partículas liberadas son de mayor tamaño y durante el tamizado aparecen en forma de aglomerados.

Una vez obtenido el producto del proceso anteriormente analizado, se realiza una operación de **tamizado**, puesto que los nanomateriales están aglomerados.

En la Figura 10 se recoge la concentración registrada en distintos puntos en torno a las zonas de medida (campo cercano, medio y lejano) de las partículas liberadas al

ambiente. Al igual que en otros procesos, durante la carga y posterior descarga del material, donde se le aplica una energía alta al polvo generado (facilitando su dispersión por el aire), se registra un incremento de la concentración en el campo cercano de 5.700 partículas/cm<sup>3</sup> (nivel de fondo) hasta 16.600 partículas/cm<sup>3</sup>, siendo casi el triple de concentración durante la manipulación directa del polvo, aunque decrece hasta los niveles iniciales rápidamente al terminar. Igualmente, en el campo medio y en el campo lejano, este incremento no se registra.

De nuevo, el uso del aspirador durante la limpieza posterior crea una gran turbulencia en la zona elevando todos los registros a valores varias veces superiores a los del nivel de fondo, desaconsejando el uso de este equipo en las tareas de limpieza.

En cuanto al tamaño de las partículas liberadas al ambiente durante el proceso, se observa que pasan de un tamaño en torno a los 30 nm a tamaños por encima de 110 nm.

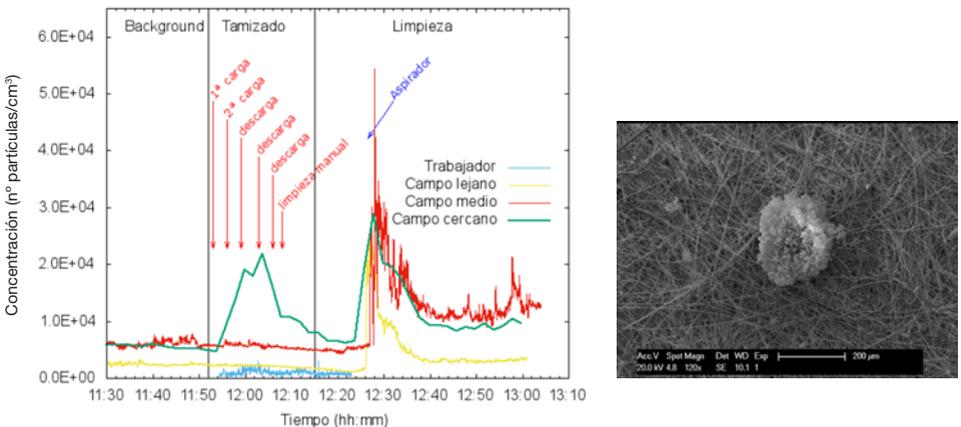


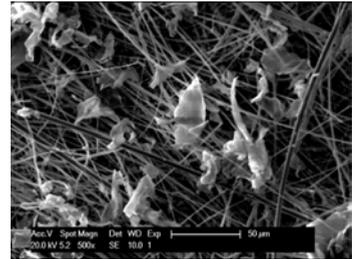
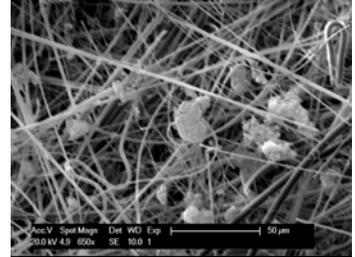
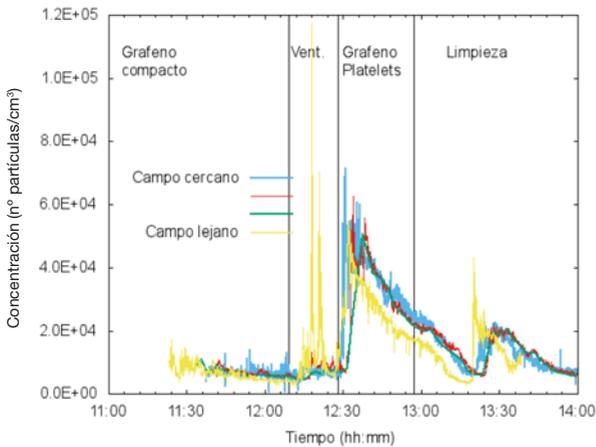
Figura 10. Resultados de las mediciones realizadas durante la operación de tamizado en la producción de nanomateriales en medio sólido (izquierda) e imagen mediante microscopía SEM (derecha).

### PROCESO 3: Empaquetado a escala piloto

El nivel de fondo registrado previamente al inicio de la tarea de empaquetado es de 6.600 partículas/cm<sup>3</sup> aproximadamente. Según se puede apreciar en la Figura 11, este valor permanece invariable durante la pesada y empaquetado del grafeno compacto o *few-layer*. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el grafeno en platelets que, al presentar menor agregación, se libera con mayor facilidad al ambiente y provoca un incremento de en torno a 36.000 partículas/cm<sup>3</sup>, con picos de hasta 71.200 partículas/cm<sup>3</sup>. Además, su baja densidad propicia su dispersión por todo el recinto si no existen medidas de control que la eviten. Por ello, el comportamiento registrado

en el campo lejano es el mismo, con un pequeño desfase temporal debido al tiempo que tarda el nanomaterial en realizar el recorrido hasta allí, y un decrecimiento más rápido, ya que el elevado tiempo de vuelo favorece su deposición en superficies. En general, la concentración durante la actividad frente al nivel de fondo no supera el valor de 3 en el caso del grafeno compacto; sin embargo, la supera ampliamente en el caso del grafeno en forma de platelets.

Analizando los datos registrados por los OPS (que alcanzan los  $10\ \mu\text{m}$ ), se observa que el grafeno compacto es el que se libera en mayor medida durante la actividad. Sin embargo, en términos de



**Figura 11.** Concentración de partículas en campos lejano y cercano registrada por los CPCs (rojo y amarillo), DiSCMini (azul) y SMPS (verde) durante la pesada y empaquetado de dos tipos distintos de grafeno e imagen mediante microscopía SEM del grafeno compacto (arriba derecha) y grafeno platelets (abajo derecha).

concentración en masa, se observa que la masa de las partículas del grafeno platelet es mayor que la del compacto, es decir, el grafeno platelet se libera en mayor medida y con más variedad de tamaños que el compacto, que se libera con un tamaño mayor de partículas pero en menor concentración en masa.

## PROCESO 4: Empaquetado a escala industrial

### a. En el interior de la nave:

Se realizan de forma consecutiva las dos operaciones, es decir, primero se empaquetan los sacos de 25 kg y a continuación los de 20 kg, ambos de  $\text{SiO}_2$ . El nivel de fondo medido corresponde a una concentración de alrededor de 9.000 partículas/ $\text{cm}^3$ . Según se observa en la Figura 12, al comenzar la tarea de empaquetado, tras un

incremento inicial de la concentración, se observa un decrecimiento y una estabilización de los valores dentro de un rango de  $(1,92 \pm 0,77) \times 10^4$  partículas/cm<sup>3</sup> durante todo el proceso, a pesar de las actividades simultáneas de limpieza y empaquetado llevadas a cabo en las zonas de alrededor. Probablemente, esto se debe al sistema de aspiración por aire que mantiene controlada la liberación de partículas. Sin embargo, cerca del final se registra un incremento de hasta  $8,4 \times 10^4$  partículas/cm<sup>3</sup>, para a continuación decaer de nuevo, pero con más variabilidad a lo largo del proceso. Es de esperar que, entre procesos, tras terminar el primer empaquetado y apagarse la máquina, mientras la cinta transportadora continúa en funcionamiento y el trabajador recoge, aumente la concentración debido a la resuspensión de las partículas, que decae a continuación en cuanto se activan los sistemas de ventilación de la segunda empaquetadora. Los datos registrados durante el segundo empaquetado siguen las mismas tendencias. En este caso, la concentración en ambos campos cercano y lejano se mantiene en valores muy similares.

En general, la concentración durante la actividad frente al nivel de fondo es muy irregular e impredecible, permaneciendo muy cercano al valor crítico de 3 e incluso casi triplicándolo en ocasiones.

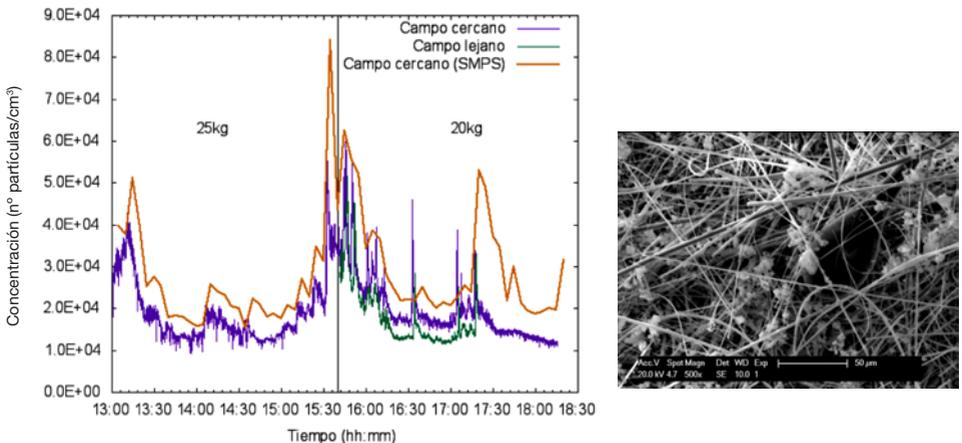


Figura 12. Concentración numérica de partículas en la zona de ensacado registrada por los CPCs y SMPS (izquierda) e imagen mediante microscopía SEM (derecha).

En la Figura 13 se muestra una gráfica en la que se representan los datos registrados con el equipo de lectura directa SMPS, durante el proceso de empaquetado. De los datos se desprende que la mayor parte de las nanopartículas se liberan en forma de agregados y aglomerados con unos tamaños superiores a los de la partícula primaria, si bien, debido a la alta energía del proceso, estos agregados y aglomerados se disgregan liberándose también partículas primarias de SiO<sub>2</sub>.

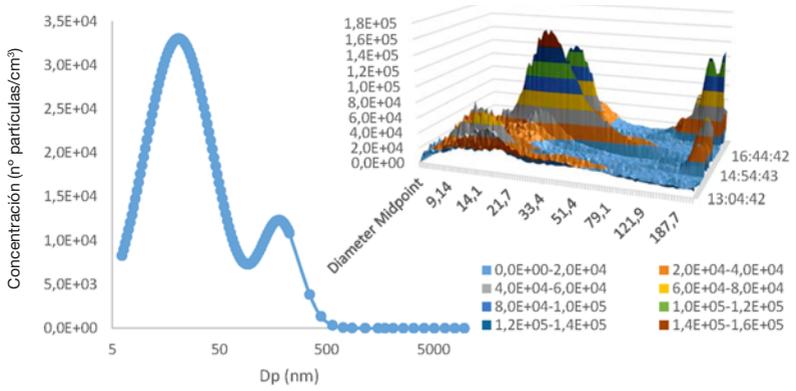


Figura 13. Distribución por tamaños durante el ensacado en el interior registrada con el SMPS. A la derecha, la evolución temporal en un gráfico 3D de esa distribución.

**b. En el exterior de la nave (al aire libre):**

Los resultados de la Figura 14 muestran una gran variación de la concentración a lo largo del proceso, con múltiples picos de diferentes magnitudes. Se han marcado los momentos de descarga en sacos y de aparición de un camión. Los picos en la concentración no se producen en la descarga sino en los momentos en que el trabajador manipula el contenido y lo traslada en la carretilla, ya que son inmediatamente posteriores a la descarga, que dura aproximadamente 5 minutos por saco.

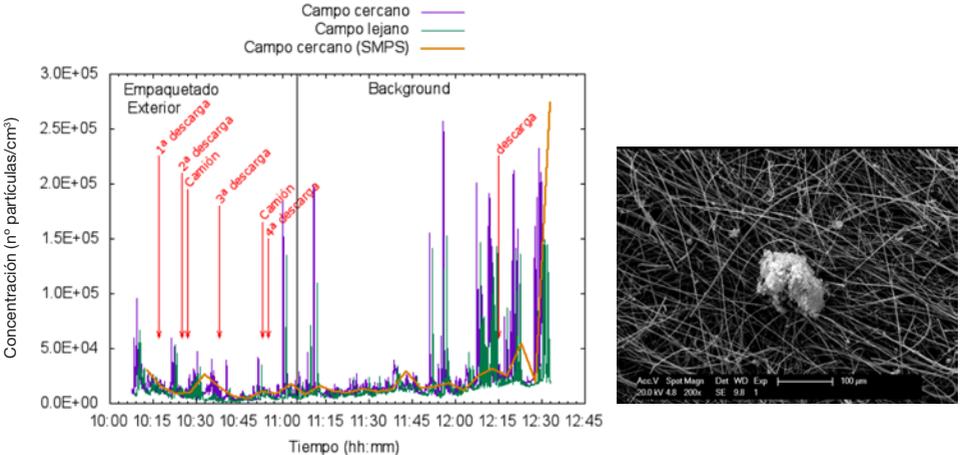


Figura 14. Concentración numérica de partículas en la zona de ensacado exterior registrada por los CPCs y SMPS (izquierda) e imagen mediante microscopía SEM que muestra las partículas de sílice en forma de aglomerados (derecha).

En este caso, la concentración del nivel de fondo es mucho mayor e irregular que la de la actividad, lo cual puede ser debido a que se retomó la actividad de descarga en las tolvas y a que apareció otro camión en la zona de descarga.

### PROCESO 5: Elaboración de mortero con cemento

Si se comparan los datos registrados de las mediciones en la zona del trabajador y en el campo lejano durante el vertido del producto en la tolva con la medida del nivel de fondo (ver Figura 15), la concentración durante la actividad se muestra irregular e impredecible, permaneciendo muy cercano al valor crítico de 3 e incluso casi triplicándolo en ocasiones. Así, la concentración media en ambos procesos se encuentra en torno a 23.000 partículas/cm<sup>3</sup> con grandes picos que triplican ese valor. Es de suponer que el material tarda en depositarse o bien que las actividades paralelas causan la alta concentración en el ambiente.

En cuanto a la concentración en masa, ocurre algo similar: hay grandes variaciones en el total, y así, mientras la media se mantiene en 2,7 mg/m<sup>3</sup>, se alcanzan valores tan altos como 46,7 mg/m<sup>3</sup>. En cuanto a la concentración por debajo de 10 µm, 1,41 mg/m<sup>3</sup> pertenecen al PM10, mientras que la fracción respirable PM4 permanece en torno a 0,69 mg/m<sup>3</sup> y la submicrométrica PM1, muy cercana con 0,54 mg/m<sup>3</sup>.

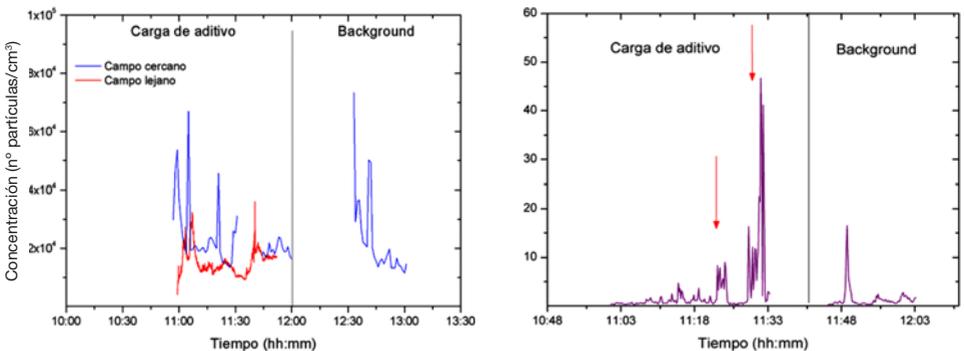


Figura 15. Concentración durante la carga de aditivo en la tolva de nanomateriales obtenida con Nanoscan en el campo cercano y CPC en el lejano (a la izquierda) y en masa obtenida con DustTrak (a la derecha).

### PROCESO 6: Enfocado

El análisis de los resultados muestra que, en general, la concentración durante la actividad con respecto a la concentración de fondo es muy baja. La concentración más alta se registró durante el volcado del material, aunque este hecho se dio también con el mortero que no contenía NM, es decir, fue la propia pulverulencia del material base la que propició la exposición. El proceso de aplicación en la pared de ambos

tipos de mortero no supuso un incremento en el número de partículas en el ambiente como ocurrió con el amasado, puesto que aquí el mortero ya se encuentra formando una pasta húmeda, lo que minimiza que las partículas de polvo pasen al ambiente.

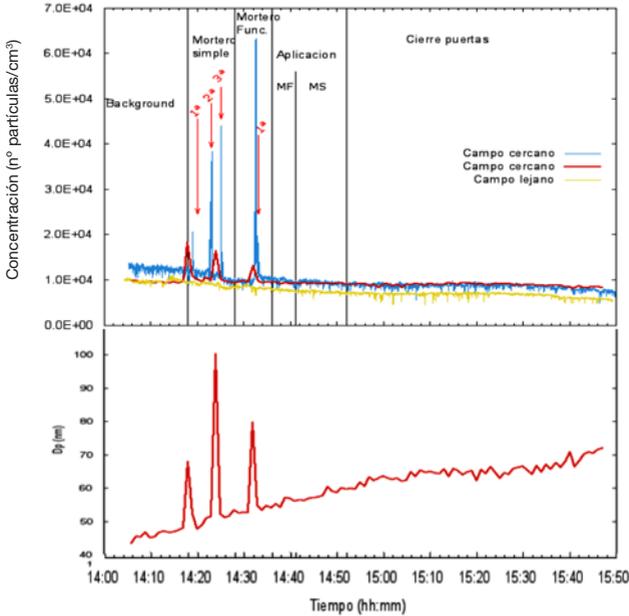


Figura 16. Concentraciones (arriba) y diámetro medio (abajo) a lo largo del proceso de mezcla y aplicación de mortero simple (MS) y mortero funcionalizado (MF) con nano-  $\text{TiO}_2$ .

### PROCESO 7: Aplicación de pinturas con rodillo y con pistola

La aplicación con pistola, a diferencia de la aplicación con rodillo, sí que produjo una liberación de partículas al ambiente puesto que, al ser pulverizada, la pintura genera aerosoles susceptibles de ser inhalados por el trabajador. La aplicación de la pintura sin nano  $\text{TiO}_2$  dio lugar a la aparición de algún pico discreto de 11.300 partículas/cm<sup>3</sup>, valor ligeramente superior al obtenido en el campo lejano. Cuando se procedió a la aplicación de la pintura fotocatalítica con nano  $\text{TiO}_2$ , la concentración de partículas registradas en la zona de respiración del trabajador alcanzó valores de hasta 35.400 partículas/cm<sup>3</sup>. Finalmente, con la pulverización del recubrimiento fotocatalítico con nano  $\text{TiO}_2$  se registraron las cotas más elevadas, llegando a alcanzar las 150.000 partículas/cm<sup>3</sup>. En este último caso, se pueden observar claramente los cuatro momentos en los que se aplicó el recubrimiento fotocatalítico. Cabe decir que, en todos los casos, los valores registrados en el campo lejano no sufrieron variaciones significativas como consecuencia de la pulverización de las pinturas.

El esprayado de la pintura plástica generó partículas con un diámetro medio de en torno a 60 nm, en el esprayado de la pintura fotoactiva con nano TiO<sub>2</sub> se obtuvo un máximo en 50 nm y la pulverización del recubrimiento fotocatalítico dio como resultado partículas con un diámetro medio en torno a 55 nm.

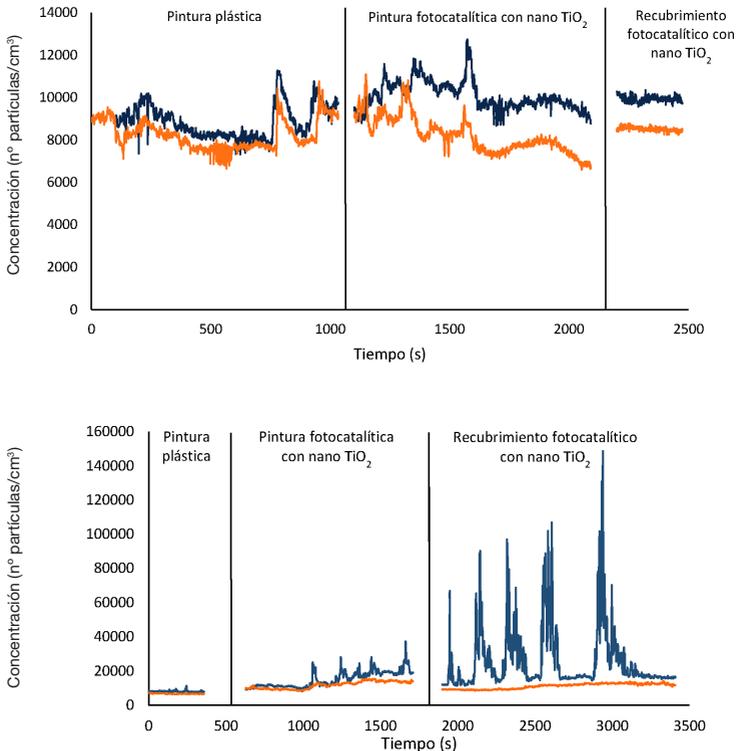


Figura 17. Concentración de partículas medidas con el CPC en el proceso de aplicación de pinturas con rodillo (arriba) y con pistola (abajo).

### PROCESO 8: Raspado y lijado

Tanto el raspado como el lijado de las diferentes superficies no supuso un incremento en la exposición, tal y como recogen los resultados obtenidos mediante los distintos equipos situados en la zona de respiración del trabajador. Este hecho puede deberse a que las partículas generadas mediante estos procesos tengan un tamaño elevado y, por lo tanto, una mayor tendencia a depositarse en el suelo. Las partículas registradas en la zona de respiración del trabajador no superaron, en ninguno de los casos estudiados, el doble de las partículas de fondo medidas (ver Figura 18).

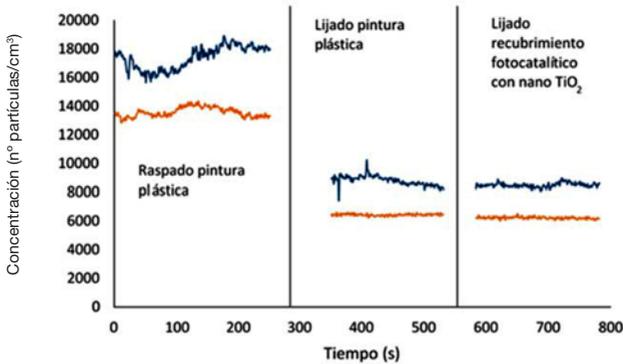


Figura 18. Concentración de partículas medidas con CPC en el proceso de raspado y lijado de diferentes superficies. Nivel de fondo (color naranja) y zona de respiración (color azul).

### PROCESO 9: Corte con radial

El corte con radial portátil de distintos materiales supuso un incremento en la concentración de partículas registradas en la zona de respiración del trabajador.

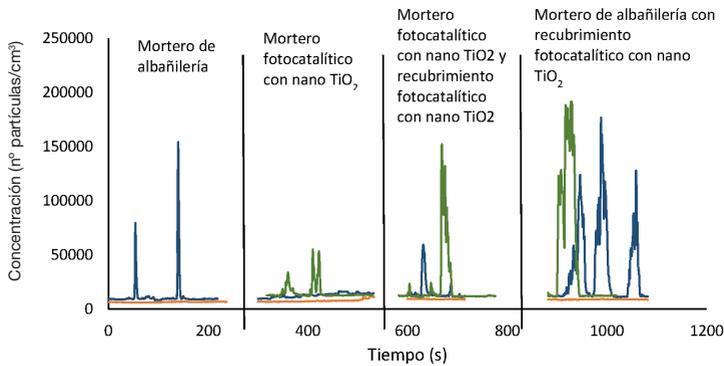
Por lo que se refiere al corte de un mortero de albañilería, se registraron dos picos puntuales de exposición, de 79.000 y 154.000 partículas/cm<sup>3</sup>. Estos valores se alcanzaron durante períodos de tiempo muy cortos (unos pocos segundos), mientras que durante el resto de la actividad la concentración de partículas permaneció prácticamente en los mismos niveles que los registrados en el campo lejano.

En el caso del corte del mortero fotocatalítico con nano TiO<sub>2</sub>, se registraron valores de pico de 19.750 partículas/cm<sup>3</sup>, aunque el valor medio obtenido en la zona de respiración del trabajador fue similar al registrado en el campo lejano. Por otra parte, se llevaron a cabo mediciones en el foco, obteniéndose valores mayores a los registrados en la zona de respiración del trabajador, llegando a valores de 53.000 partículas/cm<sup>3</sup>.

La aplicación de la radial a la zona con mortero con nano TiO<sub>2</sub> y recubrimiento fotocatalítico, también con TiO<sub>2</sub>, aumentó la concentración en la zona de respiración del trabajador hasta más de cinco veces el valor del fondo. Además, las mediciones realizadas en la fuente incrementaron este valor hasta llegar a superar la concentración de fondo en 13 veces.

Por último, el corte del mortero de albañilería con recubrimiento fotocatalítico con nano TiO<sub>2</sub> supuso el mayor incremento de partículas registradas en la zona de respiración.

En este escenario se registraron concentraciones de partículas superiores a las 150.000 partículas/cm<sup>3</sup>, valor 13 veces superior al de fondo. Finalmente, las mediciones realizadas en el foco dieron lugar a valores similares a los obtenidos en la zona de respiración del trabajador.



**Figura 19.** Concentración de partículas medidas con CPC en el proceso de corte con radial portátil de diferentes superficies. Nivel de fondo (color naranja), zona de respiración (color azul) y foco (color verde).

El corte de una pared enfoscada con mortero de albañilería generó partículas con un diámetro medio de 50 y 300 nm teniendo en cuenta la distribución por número de partículas. El proceso de corte de la pared enfoscada mediante mortero con nano  $\text{TiO}_2$  generó partículas con un diámetro medio de 60 nm teniendo en cuenta el número de partículas. Las partículas registradas en la zona de respiración generadas debido al corte del mortero con nano  $\text{TiO}_2$  y recubrimiento fotocatalítico, también con nano  $\text{TiO}_2$ , tuvieron un diámetro medio de 60 nm teniendo en cuenta el número de partículas. Las partículas medidas en la zona de respiración del trabajador durante el corte del mortero de albañilería y recubrimiento fotocatalítico con nano  $\text{TiO}_2$  registraron un diámetro medio de 100 nm.

A continuación, se realizaron los ensayos de corte con la radial fija en seco y en húmedo, primero con ladrillos con mortero de albañilería y, en segundo lugar, con ladrillos con mortero con NM.

Los niveles más altos se registraron durante el corte de mortero funcionalizado en seco, alcanzándose valores tan altos como 83.500 partículas/cm<sup>3</sup> en los dos cortes sucesivos en seco. Al aplicar humedad, la concentración permanece alta pero va decayendo lentamente, por lo que se une al pico anterior hasta alcanzar de nuevo valores de fondo.

En cuanto a los tamaños, se observa igualmente una gran variabilidad coincidiendo con cada proceso de corte en seco. Es decir: se liberaba más material que se agregaba o era de mayor tamaño, pasando de los iniciales 72 nm a picos de 187 y 197 nm.

En general, la concentración durante la actividad frente al fondo es baja; sin embargo, los picos generados durante el corte en seco aumentan hasta 25 veces el nivel de exposición. A pesar de ser un proceso muy breve, la liberación es extremadamente alta, por lo que es preferible usar agua durante el corte.

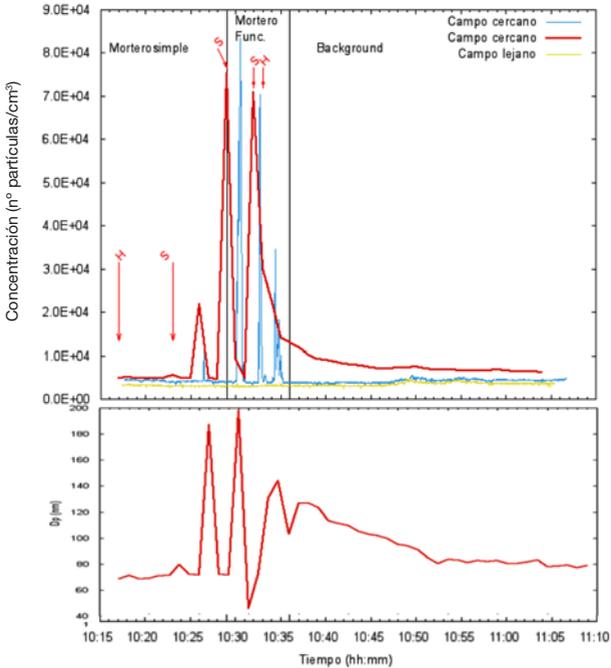
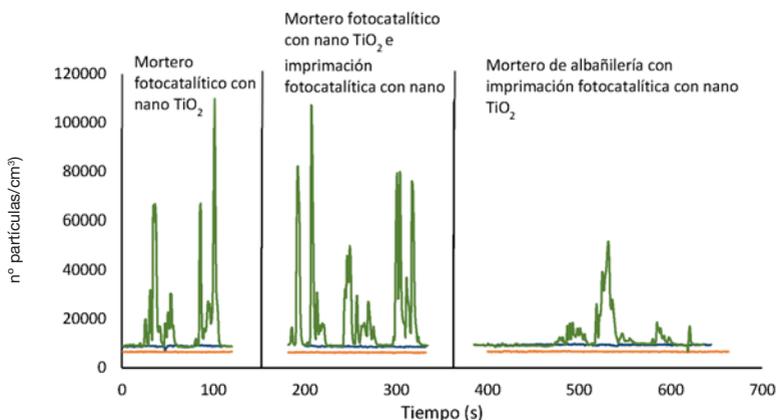


Figura 20. Concentraciones (arriba) y diámetro medio (abajo) a lo largo del proceso de corte del ladrillo con una radial en seco (S) o en húmedo (H) con ambos tipos de mortero aplicados en él.

## PROCESO 10: Retirada

Como puede verse en la Figura 21, las mediciones llevadas a cabo en la zona de respiración del trabajador no presentaron en ningún caso incrementos significativos de partículas debidas a esta actividad. Este hecho puede deberse a que, mediante el golpeo de los diferentes materiales, se generaban partículas de un tamaño elevado que tendían a sedimentar antes de llegar a la zona de respiración del trabajador.

No ocurrió lo mismo cuando las mediciones se efectuaron en la fuente. En este caso, cuando se retiró el mortero con nano  $\text{TiO}_2$ , se alcanzaron picos de concentraciones superiores a las 100.000 partículas/cm<sup>3</sup>. La demolición del mortero con nano  $\text{TiO}_2$  y recubrimiento fotocatalítico también registró valores elevados de partículas, superando el valor de 100.000 partículas/cm<sup>3</sup>. Por último, las medidas llevadas a cabo en la fuente cuando se procedió a la retirada del mortero de albañilería registraron valores inferiores a los anteriores, obteniendo un valor máximo de 50.000 partículas/cm<sup>3</sup>.



**Figura 21.** Concentraciones obtenidas durante la demolición con martillo de mortero con nano  $\text{TiO}_2$ .

## 6.9. Conclusiones del estudio

En general, se puede observar cómo la mayoría de los niveles de concentración medidos permanecen en el rango por debajo de un ratio de 3, atendiendo al criterio de la OCDE, aunque en determinados momentos, generalmente puntuales, lo superan con creces, creando una situación de riesgo para el trabajador si no va suficientemente protegido.

Una concentración durante la actividad superior a 3 veces el nivel de partículas de fondo supone una exposición significativa. Esto no quiere decir que necesariamente hay una situación de riesgo para el trabajador sino que es posible y que, por tanto, se debería continuar estudiando la actividad para poder establecer una conclusión sobre ello.

El diámetro geométrico medio de la mayor concentración de nanopartículas se encuentra por debajo de 100 nm o consta de dos modos, uno por debajo y otro por encima, probablemente formado por aglomerados del anterior.

Otros factores ambientales como la humedad del ambiente, corrientes de aire (si, por ejemplo se trabaja en el exterior) o procesos vecinos simultáneos, así como la presencia de medidas de control, podrían variar los valores de exposición registrados.

A continuación, se detallan algunas conclusiones que se desprenden del estudio de cada proceso.

### **PROCESO 1: Producción de $\text{SiO}_2$ en medio líquido**

Teniendo en cuenta los niveles de concentración obtenidos durante la última **descarga de material** (alrededor de 15.000 partículas/cm<sup>3</sup>) y siendo el nivel de fondo 3.900 partículas/cm<sup>3</sup>, se puede determinar que, en el proceso de producción de  $\text{SiO}_2$  en medio líquido, la descarga del producto final por una canaleta a un saco de plástico no es una actividad que presenta una exposición significativa a nanomateriales, pero sí puede serlo la repetición de dicha actividad puesto que se acumula el material liberado de una descarga a otra. Con solo tres ciclos se alcanzó tres veces el nivel de fondo y se ve claramente la tendencia a ir aumentando la concentración según se van repitiendo los ciclos de producción.

En el esquema 1 se puede observar que el campo medio (a 2 metros de la fuente) durante el proceso de producción registra niveles de concentración prácticamente análogos al campo lejano (a 5 m), indicando la **baja dispersión espacial** de los nanomateriales liberados.

En general, la concentración medida por el equipo en el campo cercano (SMPS) durante la actividad no supera el valor de 3 veces el nivel de fondo; sin embargo, en la tarea de limpieza se alcanzaron niveles muy altos. Es importante seguir las recomendaciones dadas en el apartado de medidas preventivas para la limpieza.

Por tanto, se encuentran **dos puntos críticos con exposición significativa**:

- la última operación de descarga, que por sí sola no representa una exposición significativa, por lo que sería aconsejable aplicar medidas de control en la descarga del producto que impidan o reduzcan la emisión de partículas al ambiente,
- las tareas de limpieza, aunque el trabajador está suficientemente protegido con los equipos de protección respiratoria.

### **PROCESO 2: Síntesis de $\text{SiO}_2$ en medio sólido**

Durante la operación de limpieza se obtienen niveles muy altos de concentración en los campos cercano, medio y lejano.

La medida en el interior de la máscara completa con filtro P3 que porta el trabajador indica una concentración hasta 33 veces inferior (en torno a 650 partículas/cm<sup>3</sup>) respecto a la concentración registrada durante la producción del nanomaterial, por lo que, a pesar del incremento de exposición durante el proceso, el uso del EPI de las vías respiratorias demuestra su eficacia en la reducción de la exposición del trabajador.

Durante los procesos de producción y tamizado se puede apreciar que las áreas superficiales del DiSCmini y el Aerotrak difieren, indicando que probablemente las partículas son individuales en lugar de aglomerados.

Aunque se esperaba una mayor liberación de partículas, debido a que es un proceso en medio sólido, los niveles aumentan en la fase de descarga. A diferencia del proceso en medio líquido, los niveles alcanzados son similares en las cuatro descargas.

En general, la concentración medida durante la actividad no supera el valor de 3 veces el nivel de fondo, excepto en momentos puntuales durante las tareas de limpieza, donde el uso del aspirador está desaconsejado. Igual que en el proceso anterior el principal punto a controlar es la limpieza, ya que el propio aspirador no sólo resuspende las partículas sino que las está liberando al ambiente al no tener un sistema de filtrado, por lo que su uso no se recomienda. Por tanto, se consideran **las tareas de limpieza como actividades con exposición significativa**.

### ***PROCESO 3: Empaquetado y pesada a escala piloto***

En este caso, el tipo de producto es fundamental a la hora de determinar si la exposición es o no significativa. Para una misma tarea, los resultados de las mediciones demuestran que, con el grafeno compacto no se aprecia liberación del material durante la realización de la misma, mientras que, utilizando grafeno platelets, por su forma y su comportamiento, el número de partículas liberadas al ambiente aumenta considerablemente, superando el valor de 3 veces el nivel de fondo, por lo que se puede considerar que durante la tarea de **empaquetado y pesada de grafeno platelets la exposición es significativa y sería recomendable disponer de medidas de contención para evitar el vuelo del grafeno platelets**.

### ***PROCESO 4: Empaquetado a escala industrial***

La realización de la tarea en el interior de la nave muestra unas concentraciones muy irregulares e impredecibles pero que se acercan, o incluso lo superan en ocasiones, al valor de 3 veces el nivel de partículas de fondo, por lo que el trabajador se encontraría con una **exposición significativa**.

En el caso de la operación realizada en el exterior de la nave, ha sido difícil medir con precisión por la influencia de las condiciones climatológicas (el cambio en la dirección del viento fundamentalmente) y la interferencia de otros procesos simultáneos (como el paso de camiones para la recogida y transporte de material) y los resultados muestran una gran variación de la concentración a lo largo del proceso, superando en algunos casos el valor de 3 veces el nivel de partículas de fondo.

### ***PROCESO 5: Elaboración de mortero con cemento con nano-TiO<sub>2</sub>***

En este caso, no se puede extraer una conclusión sobre si la exposición es significativa en la tarea estudiada, puesto que la irregularidad en los datos obtenidos puede deberse a la actividad continua y la circulación de vehículos a motor en las proximidades.

### **PROCESO 6: Enfocado**

El proceso de aplicación de ambos tipos de mortero en la pared no supuso un incremento en el número de partículas en el ambiente pero el proceso de amasado sí. Esto es porque durante la aplicación, el mortero ya se encuentra formando una pasta húmeda, propiciando la aglomeración de las partículas y su deposición más rápida, lo que minimiza que las partículas de polvo pasen al ambiente. En general, la concentración es muy baja, no se produce aumento respecto al nivel de fondo excepto en el momento de volcado de material para su amasado, que aumenta hasta 13 veces el nivel de las partículas de fondo, por lo que se puede considerar que hay una **exposición significativa en el momento de vertido durante el proceso de amasado**.

### **PROCESO 7: Aplicación de pintura con rodillo y con pistola**

La aplicación de los dos tipos de pinturas y el recubrimiento fotocatalítico empleando un rodillo no supuso un incremento significativo en el número de partículas en el ambiente. Este comportamiento puede deberse a que, puesto que las pinturas están en base acuosa, los componentes permanecen en la dispersión, evitando su liberación al ambiente, por lo que, una vez más, se pone de manifiesto la preferencia de trabajar con productos líquidos en lugar de productos en polvo siempre que sea posible.

El **esprayado del recubrimiento fotocatalítico** generó gran cantidad de nanopartículas, superando en más de 10 veces el nivel de partículas del fondo cuando se producía la pulverización, por lo que esta tarea presenta una **exposición significativa**.

### **PROCESO 8: Operaciones de raspado y lijado**

Sin hallazgos significativos. Estas operaciones no han supuesto un incremento en la cantidad de nanopartículas.

### **PROCESO 9: Operaciones de corte con radial**

A la vista de los datos obtenidos en las cuatro operaciones de corte realizadas con radial portátil, se puede comprobar que esta tarea produce un incremento de partículas susceptibles de ser inhaladas por los trabajadores. En algunos momentos puntuales se llega a superar 20 veces el nivel de partículas de fondo, por lo que la **exposición es significativa**.

Los diferentes ensayos de corte con radial fija en seco y húmedo permiten ratificar la conclusión de que es preferible utilizar aporte de agua durante el corte. La concentración durante la actividad es baja en relación con el nivel de fondo; sin embargo, se generan varios picos durante el corte en seco que suponen un aumento de hasta 25 veces del nivel de partículas de fondo y, por tanto, **una exposición significativa**.

## PROCESO 10: Retirada de material-Demolición

Aunque las medidas en la fuente alcanzaron picos de concentraciones elevadas, durante el proceso de demolición, la concentración de partículas registradas en la zona de respiración del trabajador no varió significativamente respecto a la obtenida en campo lejano, por lo que esta tarea no supone un riesgo de exposición para el trabajador.

## 7. CONCLUSIONES GENERALES

De los resultados obtenidos se puede concluir que existen una serie de factores que van a afectar a la liberación de nanomateriales al ambiente, independientemente de la actividad que se realice. A continuación se describen cada uno de ellos y se proponen distintas medidas preventivas que pueden disminuir significativamente la liberación de nanomateriales al ambiente:

- **La energía de la operación.** Cuando el **vertido** se realiza a pequeña escala con una energía relativamente baja, la exposición es mucho menor que si se realiza un vertido automático con una energía mucho mayor. En el caso concreto de los vertidos o llenados de sacos a gran escala, existen unos collares que envuelven

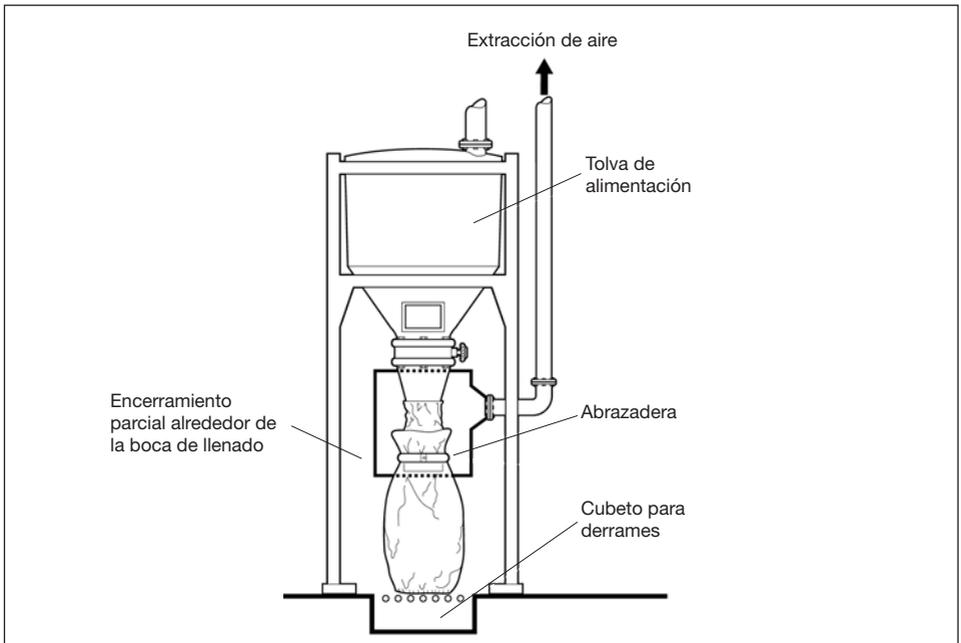


Figura 22. Operación de llenado de sacos.

el paso de la tolva al saco y evitan que pase al ambiente. Además algunos llevan un sistema de extracción localizada en su interior que retiene lo que pueda liberarse.

Los sistemas de extracción localizada con un buen diseño que envuelva bien el proceso y con una adecuada velocidad de captación, también puede ser una medida preventiva que disminuya la cantidad de nanomateriales liberados al ambiente, aunque sin ser tan eficaz como la anterior.

En operaciones de **pintura** también se pueden liberar nanomateriales. Si se realiza con una herramienta manual como brocha o rodillo, la liberación es casi inapreciable. En cambio, si se utilizan pistolas a presión, la energía destinada a nebulizar la pintura puede desprender el nanomaterial de la matriz y liberarse. En este último caso, será importante la unión que tenga el nanomaterial con la matriz de la pintura para que se libere mayor o menor cantidad.

- **Forma en la que se presenta el material.** Generalmente, se desprenderá menor cantidad de aerosol de un material líquido que de uno sólido. Y un aglomerado se liberará menos que un sólido en forma de polvo. Así, el grafeno compacto se libera menos que el platelets.



Figura 23. Operación de pesada y empaquetado del grafeno.

- **Tipo de operación realizada sobre el material que contiene nanomateriales.**  
En concreto, las operaciones de mecanizado como corte, taladrado, lijado, etc., van a liberar al ambiente pequeñas partículas de polvo procedentes del material. En estas operaciones pueden liberarse los nanomateriales contenidos en el material. Una de las medidas preventivas más prácticas por no entorpecer el trabajo y a la vez eficaces, son las herramientas que disponen de un sistema de extracción localizada que se sitúan muy próximos a la fuente de emisión y consigue capturar gran parte de las partículas emitidas. Otra medida es la realización de la operación en medio húmedo, incorporando a la herramienta un dispositivo que humedezca la superficie de trabajo de forma continua y disminuya la liberación de partículas al ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNE-ISO/TR 12885:2010 IN. Nanotecnologías. Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías.
- [2] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Siniestralidad laboral. Período enero 2012-diciembre 2012. Disponible en: [www.oect.es](http://www.oect.es). 2013.
- [3] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Análisis de las causas de los accidentes de trabajo mortales en España. INSHT. 2010. Disponible en: [www.oect.es](http://www.oect.es). 2013.
- [4] Observatorio de Enfermedades Profesionales (CEPROSS) y de Enfermedades Causadas o Agravadas por el Trabajo (PANOTRATSS). Informe anual 2011. Disponible en: [www.seg-social.es](http://www.seg-social.es). 2012.
- [5] SANZ ALBERT, F. Estudio sobre riesgos laborales emergentes en el sector de la construcción. Revisión bibliográfica. INSHT, 2013. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS%20DE%20PUBLICACIONES/EN%20CATALOGO/SEGURIDAD/riesgos%20emergentes%20sector%20construccion%202013/DT%2081-1-13%20riesgos%20emergentes%20meta.pdf>
- [6] SAYES, CM; WAHI, R; KURIAN, PA; LIU, Y; WEST, JL; AUSMAN, KD; WARHEIT, DB; COLVIN, VL 2006. Correlating Nanoscale Titania Structure with Toxicity: A Cytotoxicity and Inflammatory Response Study with Human Dermal Fibroblasts and Human Lung Epithelial Cells, *Toxicol. Sciences* 92(1), 174-185.
- [7] BHATTACHARYA, K; DAVOREN, M; BOERTZ, J; SCHINS, RPF; HOFFMANN, E; DOPP, E 2008. Titanium dioxide nanoparticles induce oxidative stress and DNA-adduct formation but not DNA-breakage in human lung cells. *Part. Fibre. Toxicol.* Vol 6: pp 17.-
- [8] VANDEBRIEL, R; WIM H DE JONG 2012. A review of mammalian toxicity of ZnO nanoparticles. *Nanotechnology, Science and Applications*.
- [9] MERGET, R; BAUER, T; KÜPPER, HU; PHILIPPOU, S; BAUER, HD; BREITSTADT, R; BRUENING, T 2002. Health hazards due to the inhalation of amorphous silica fume, *Arch. Toxicol.* 75:625.
- [10] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR). European Commission. Risk Assessment of Products of Nanotechnologies. 2009. Disponible en: [http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihr/docs/scenihr\\_o\\_023.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_023.pdf)
- [11] DONALDSON, K; A POLAND, C. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Nanotoxicity: challenging the myth of nano-specific toxicity.

- [12] STUDER, A.M.; LIMBACH, L.K.; VAN DUC, L.; KRUMEICH, F.; ATHANASSIOU, E.K.; GERBER, L.C.; MOCH, H.; STARK, W.J. Nanoparticle cytotoxicity depends on intracellular solubility: Comparison of stabilized copper metal and degradable copper oxide nanoparticles. *Toxicology Letters*, Volume 197, Issue 3.
- [13] WIJNHOFEN, SWP; PEIJNENBURG, WJGM; HERBERTS, CA ET AL. 2009. Nano-silver \_ a review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment, *Nanotoxicology*, 1-30.
- [14] VAN BROEKHUIZE, F.A.; VAN BROEKHUIZEN, J.C. Nanotechnology in the European Construction Industry- State of the art 2009- Executive. Summary [online]. Amsterdam: EFBWW, FIEC, 2009. Disponible en: <http://www.efbww.org/pdfs/Nano%20-%20final%20report%20ok.pdf>
- [15] VAN BROEKHUIZEN, P. et ál. Use of nanomaterials in the European construction industry and some occupational health aspects thereof. Springer Science+Business Media B.V. 2011.
- [16] FIEC, EFBWW (2009). Nanomaterials in the European construction industry, final report. Disponible en: [www.efbww.org](http://www.efbww.org)
- [17] Basequim 005. Mecanizado de planchas de aglomerados de sílice mediante el uso de herramientas portátiles: exposición a sílice cristalina.
- [18] KLENKE, M. (2008): "First results for safe procedures for handling nanoparticles". Dissemination Report DR321 -200810-6. Disponible en: [http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR6\\_s.pdf](http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR6_s.pdf)
- [19] GOLANSKI, L. et ál. (2008): "Are conventional protective devices such as fibrous filter media, cartridge for respirators, protective clothing and gloves also efficient for nanoaerosols?" Dissemination Report DR325/326 -200801-1. [http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR1\\_s.pdf](http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR1_s.pdf)
- [20] OECD. Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials No. 77. Gold nanoparticle occupational exposure assessment in a pilot scale facility. ENV/JM/MONO(2016) 60.
- [21] M. Methner, L. Hodson, a Dames, C. Geraci, Nanoparticle Emission Assessment Technique (NEAT) for the identification and measurement of potential inhalation exposure to engineered nanomaterials--Part B: Results from 12 field studies., *J. Occup. Environ. Hyg.* 7 (2010) 163–76.





DD.95.1.17



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE EMPLEO  
Y SEGURIDAD SOCIAL



Instituto Nacional de Seguridad,  
Salud y Bienestar en el Trabajo