



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

Medición de NM en lugares de trabajo: Casos prácticos

Webinario

- ✓ Metodologías de evaluación cuantitativa:
 - UNE-EN 17058:2022
- ✓ Casos prácticos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

RD 374/2001

Evaluación de los riesgos derivados de la exposición
por inhalación a agentes químicos peligrosos

Medición de la concentración
del agente químico en el aire



Valor límite ambiental



Concentración en masa



Efectos toxicológicos

PARTÍCULAS NANOMÉTRICAS



Efectos toxicológicos



Área superficial
Número de partículas



No VLA específicos

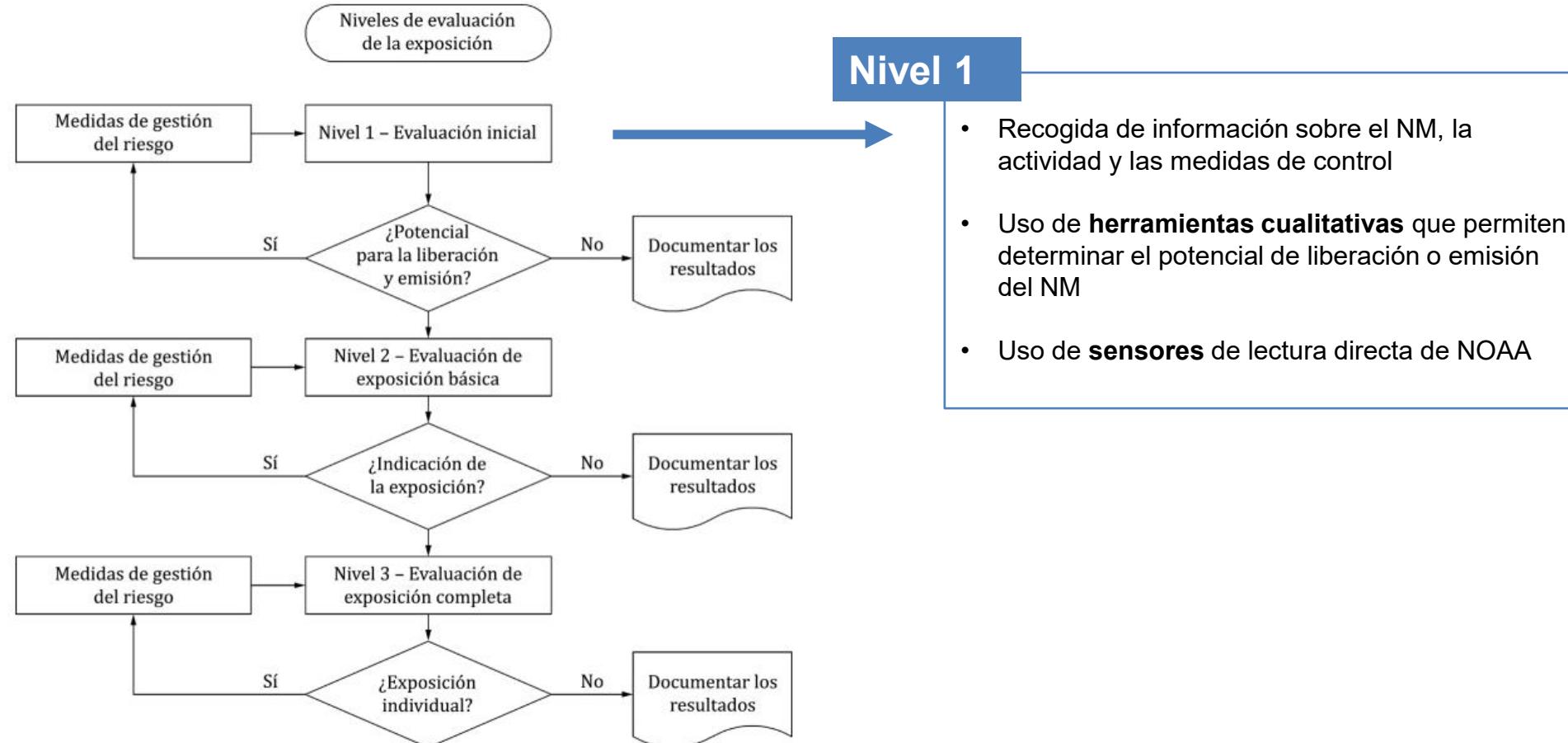
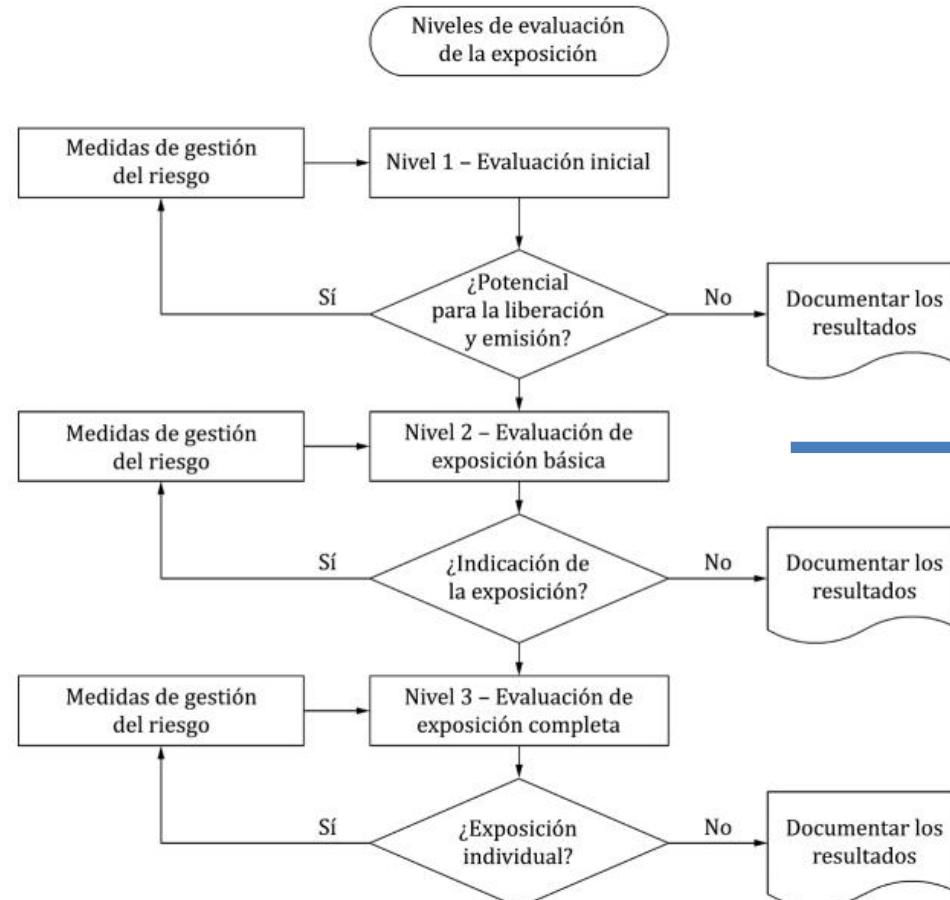


Figura 1 - Bloques de construcción y visión general de un enfoque genérico por etapas sucesivas



Nivel 2

- Instrumentos de lectura directa portátiles
 - Muestreo de la actividad
 - Muestreo del fondo (referencia)
- Muestreo con filtros para análisis químico y/o microscopía electrónica (SEM/TEM)

Figura 1 - Bloques de construcción y visión general de un enfoque genérico por etapas sucesivas



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

Nivel 2

Instrumentos de lectura directa portátiles

Condensation Particle Counter (CPC)



- Modelo 3007
- Estático (1,7 kg)
- Concentración número partículas
- Rango 0 - 100.000 partículas/cm³
- Tiempo respuesta: 1 segundo
- 10 nm - 1 µm

Optical Particle Sizer (OPS)



- Modelo 3330
- Estático (2 kg)
- Concentración número partículas
- Distribución del tamaño (16 canales)
- Rango 0 - 3.000 partículas/cm³
- Tiempo respuesta: 1 segundo
- 300 nm - 10 µm

DiSCmini



- Personal (700 g)
- Concentración número partículas
- Área superficial partículas depositadas en zona alveolar (LDSA)
- Rango 1.000 - 1.000.000 partículas/cm³
- Tiempo respuesta: 1 segundo
- 10 - 700 nm

Muestreadores

Ciclón



Higgins - Dewell
(plástico)
3,0 l/min



GK 2.69
4,2 l/min

- Personal / ambiental
- Fracción respirable
- Filtros adecuados para análisis químico

Cassette abierta

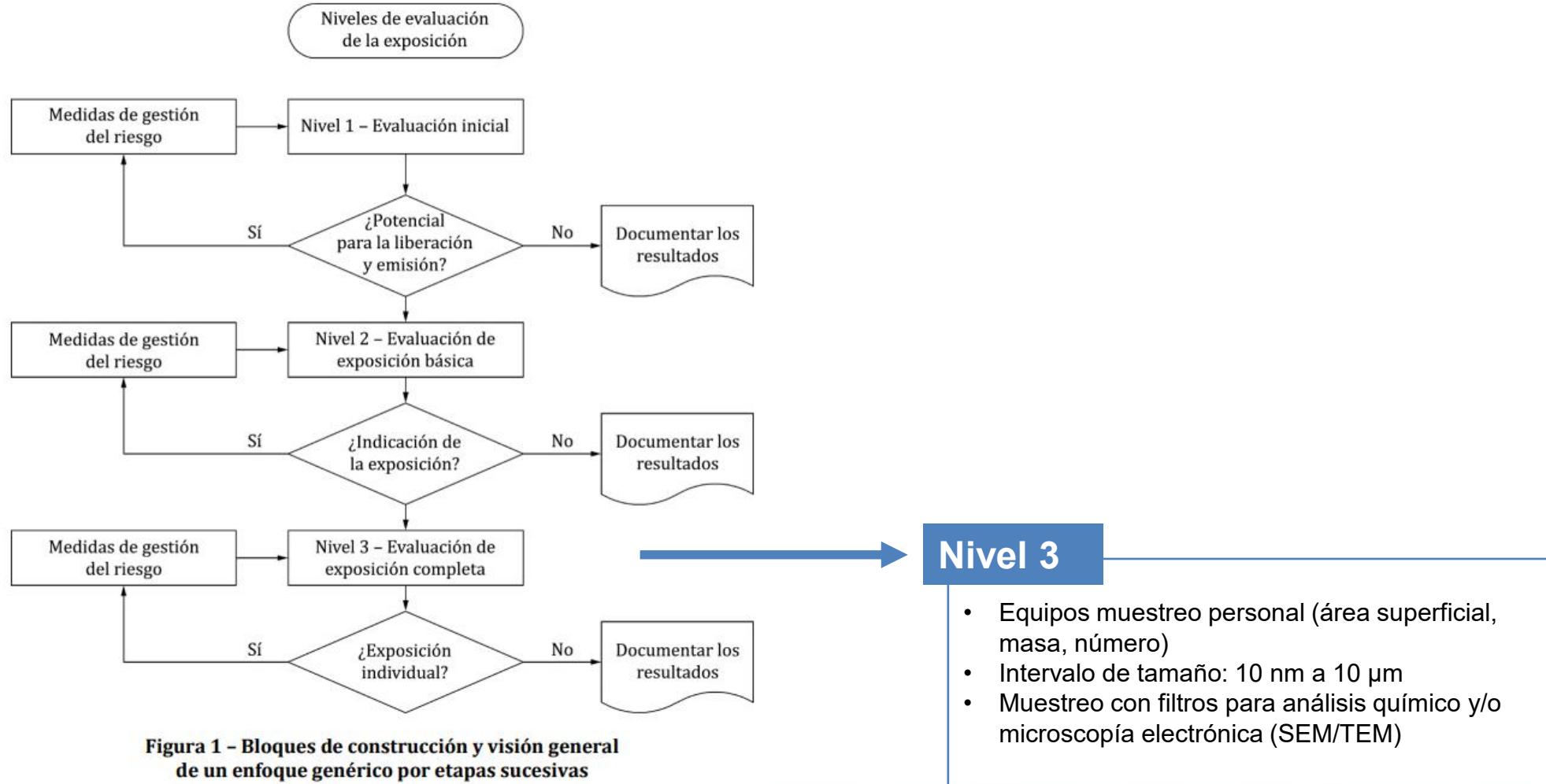


- Personal / ambiental
- SEM - EDX

Mini Particle Sampler (MPS)



- Personal / ambiental
- TEM
- < 1 µm
- 0,3 a 1,5 l/min





Nivel 3

Instrumentos de lectura directa

Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)



- Modelo 3938
- Estático (15 kg + CPC)
- Concentración número partículas
- Distribución de tamaño
- Tiempo de respuesta: 20 segundos
- Rango 0 - 10^7 partículas/cm³
- 1 nm - 1 μ m

Electrical Low Pressure Impactor (ELPI+)

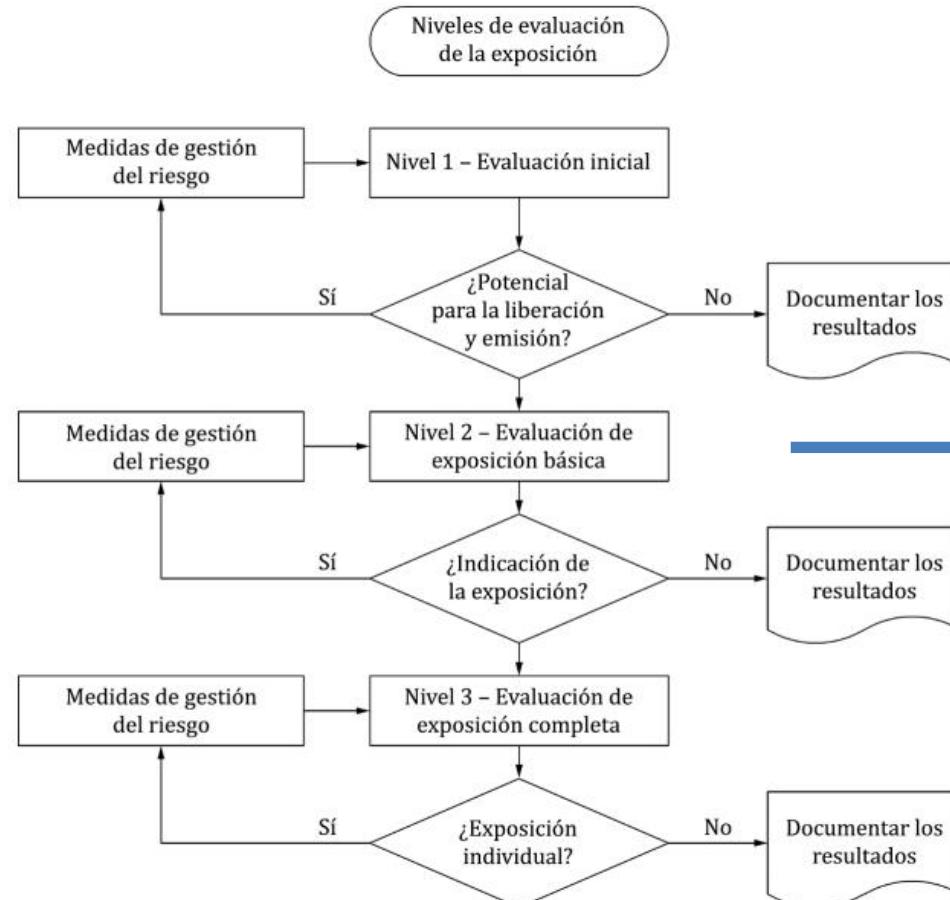


- Estático (15 kg, 22 kg con impactador)
- Concentración número partículas
- Distribución de tamaño
- Tiempo de respuesta: 0,1 segundos
- Filtros para análisis químico
- Rango 0 - 10^7 partículas/cm³
- 6 nm - 10 μ m

Muestreadores

Nivel 2

Nivel 2



Nivel 2

- Instrumentos de lectura directa portátiles
 - Muestreo de la actividad
 - Muestreo del fondo (referencia)
- Muestreo con filtros para análisis químico y/o microscopía electrónica (SEM/TEM)

Figura 1 - Bloques de construcción y visión general de un enfoque genérico por etapas sucesivas



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

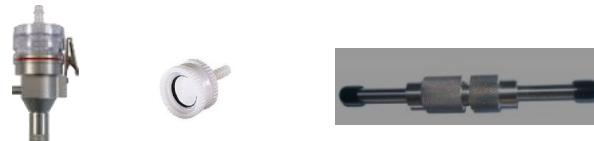
ESTRATEGIA DE MEDICIÓN

FUENTE

Equipos de lectura directa



Muestreadores



Muestreadores



FONDO

Equipos de lectura directa

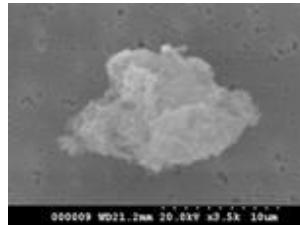


Muestreadores



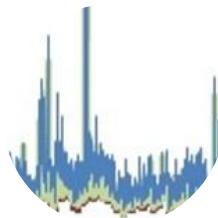


Dificultades asociadas a la medición del número de partículas



Formación de aglomerados:

- ¿Qué rango de tamaño se debería medir?



Diferenciación de las partículas fondo:

- Los instrumentos de lectura directa discriminan por tamaño (no por naturaleza química).
- Los NM pueden formar agregados con las partículas de fondo.
- Fuentes secundarias de partículas nanométricas.



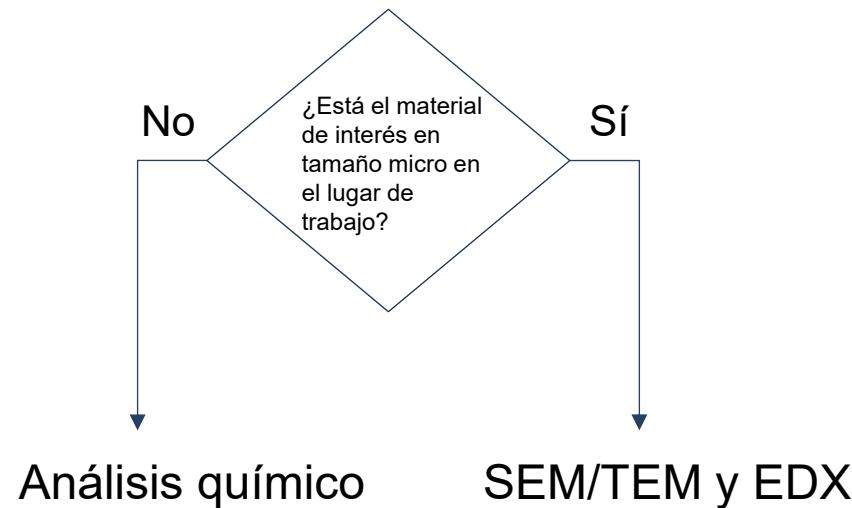
Limitaciones asociadas a los instrumentos de lectura directa:

- Diseñados para medir partículas esféricas.
- Hay pocos instrumentos que midan un rango amplio de tamaño de partículas.
- Incertidumbre alta ($\pm 20 - 30\%$).

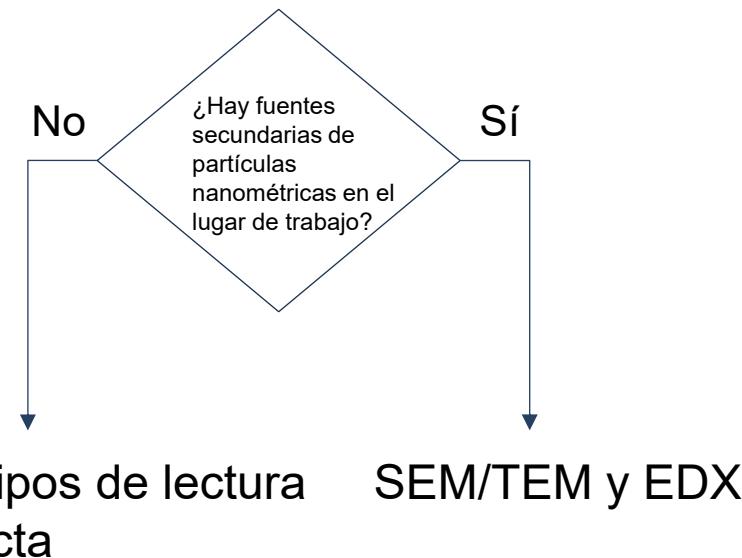


POSIBLES LIMITACIONES

ANÁLISIS QUÍMICO

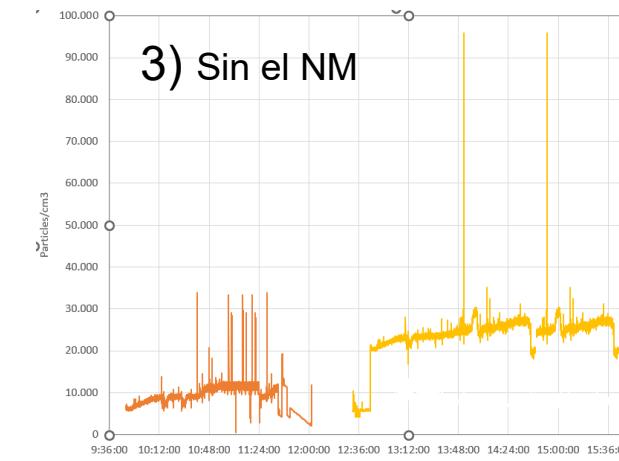


EQUIPOS DE LECTURA DIRECTA



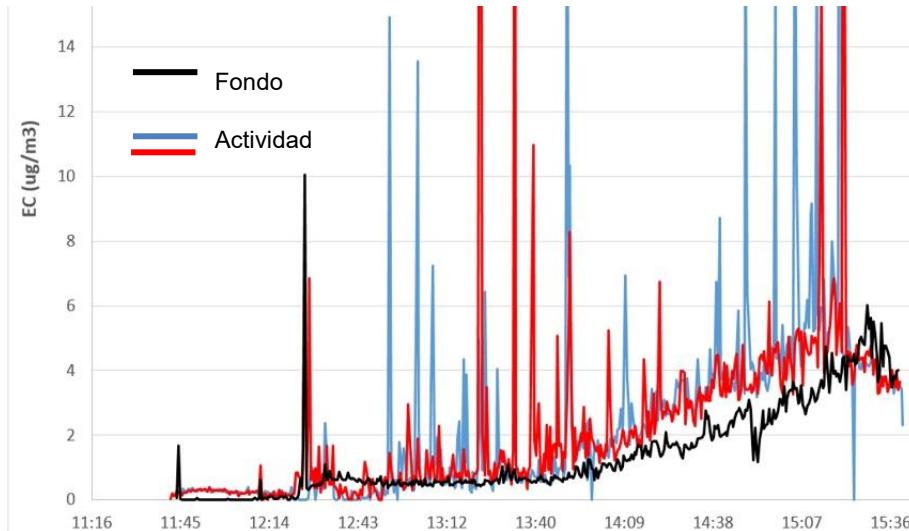
Medida de la concentración de NM de fondo (*background*)

- 1) Simultáneamente durante la actividad con el NM en un sitio alejado de la fuente (campo lejano/*far field*).
- 2) Antes y después de la actividad (si no hay fuentes secundarias de NM).
- 3) Durante la actividad SIN el NM (p. ej. extrusión, tratamiento mecánico de nanocomposites).



Evaluar mediciones/resultados de los equipos de lectura directa

Análisis de la diferencia entre la concentración durante la actividad (donde se manipulan NM) y la de fondo para ver si es significativa.



Métodos:

✓ Estadísticos: p. ej. ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average).

✓ Regla de decisión:

$$M_{act} > M_{bgr} + 3 S_{bgr}$$

- M_{act} es la concentración media durante la actividad donde se manipulan NM.
- M_{bgr} es la concentración media del fondo.
- SD_{bgr} es la desviación estándar de la concentración de fondo.



Tabla 2 - Resumen de la lógica de decisión genérica

Resultados de los análisis fuera de línea (Presencia de partículas respirables en suspensión en el aire en la zona de respiración con una composición química idéntica a la del nanomaterial investigado)	Resultados de la monitorización en línea (DRI) (Importancia del efecto de la actividad ^a)	Conclusión (Probabilidad de exposición inducida por la actividad del nanomaterial)
+	significativo	probable ^b
+	no significativo	possible/no se excluye
-	significativo ^c	possible/no se excluye
-	no significativo	improbable

^a Nivel de exposición = significativo cuando el nivel de efecto de la actividad (es decir, la diferencia media de concentración entre la concentración del fondo y la de la zona de respiración durante la actividad) era significativo según las estimaciones de los modelos ARIMA ($p < 0,05$) (véase el anexo D) o según las conclusiones con una regla de decisión (RD) (véase el anexo D).

^b La probabilidad se convierte en *possible/no se excluye* cuando se observan fuentes secundarias.

^c Indicación de la presencia de nanopartículas generadas por el proceso, pero no de los NOAA investigados (como se determinó con el análisis fuera de línea).



Trasvase y pesada de óxido de grafeno

Tareas:

- T1- Trasvase y pesada en vitrina de gases de recirculación sin conducto.
- T2- Trasvase en vitrina de gases con salida al exterior, sistema de extracción apagado.
- T3- Apertura de bolsa en vitrina de gases, sistema extracción apagado.
- T4- Limpieza de vitrina de gases.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

ESTRATEGIA DE MEDICIÓN

FUENTE



FONDO

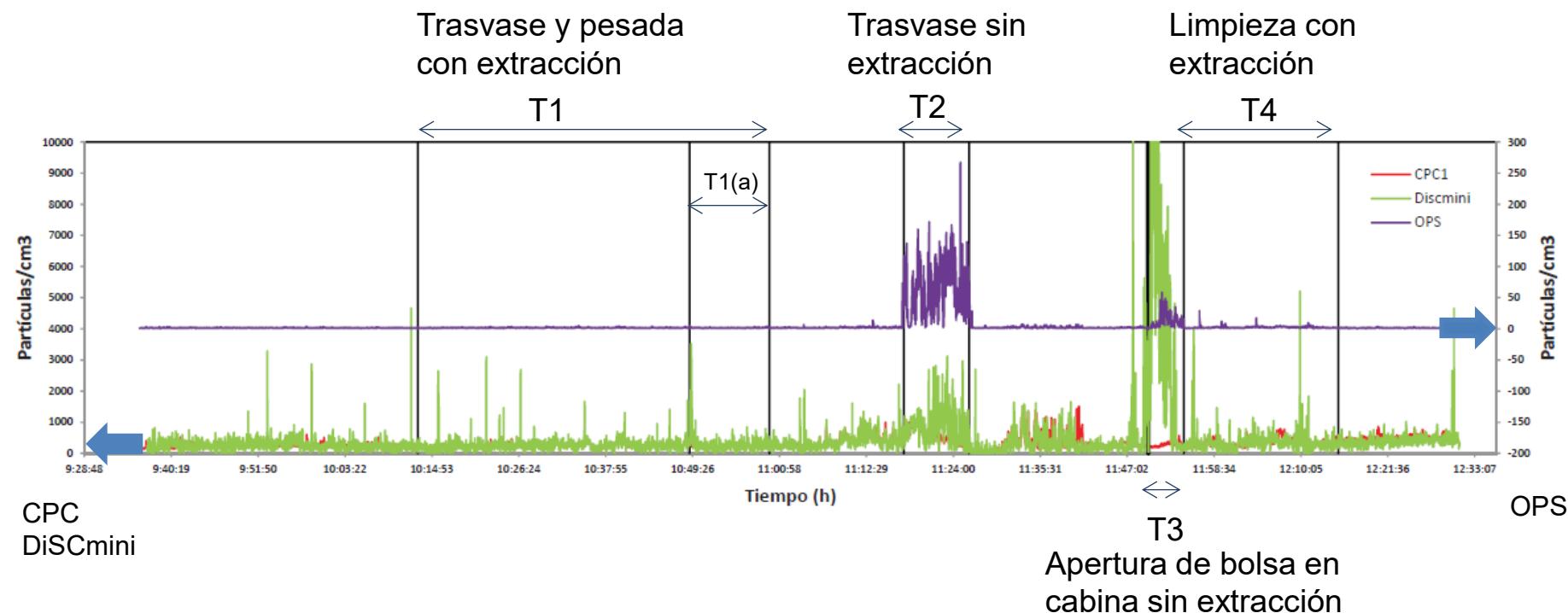




CASO PRÁCTICO 1

Manipulación de óxido de grafeno en laboratorio de investigación

FUENTE

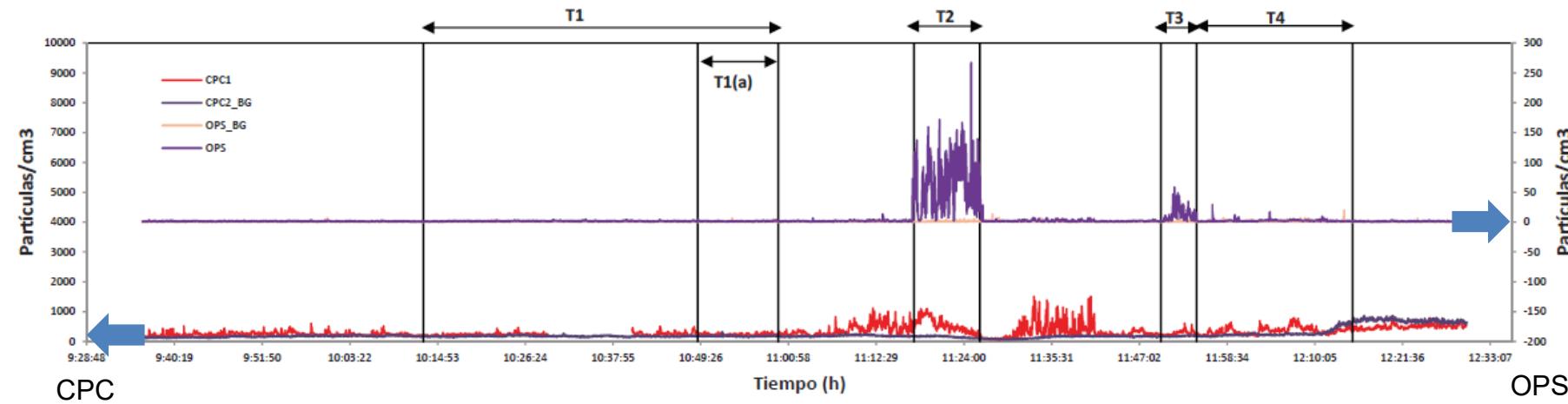




CASO PRÁCTICO 1

Manipulación de óxido de grafeno en laboratorio de investigación

COMPARACIÓN FUENTE - FONDO





CASO PRÁCTICO 1

Manipulación de óxido de grafeno en laboratorio de investigación

ANÁLISIS QUÍMICO

Tarea	Carbono elemental (mg/m ³)
T1- Trasvase y pesada con ext. localizada	< LD
T2- Trasvase sin ext. localizada	< LD
T3- Apertura de bolsa en cabina sin ext. localizada	< LD
T4- Limpieza con extracción localizada	< LD



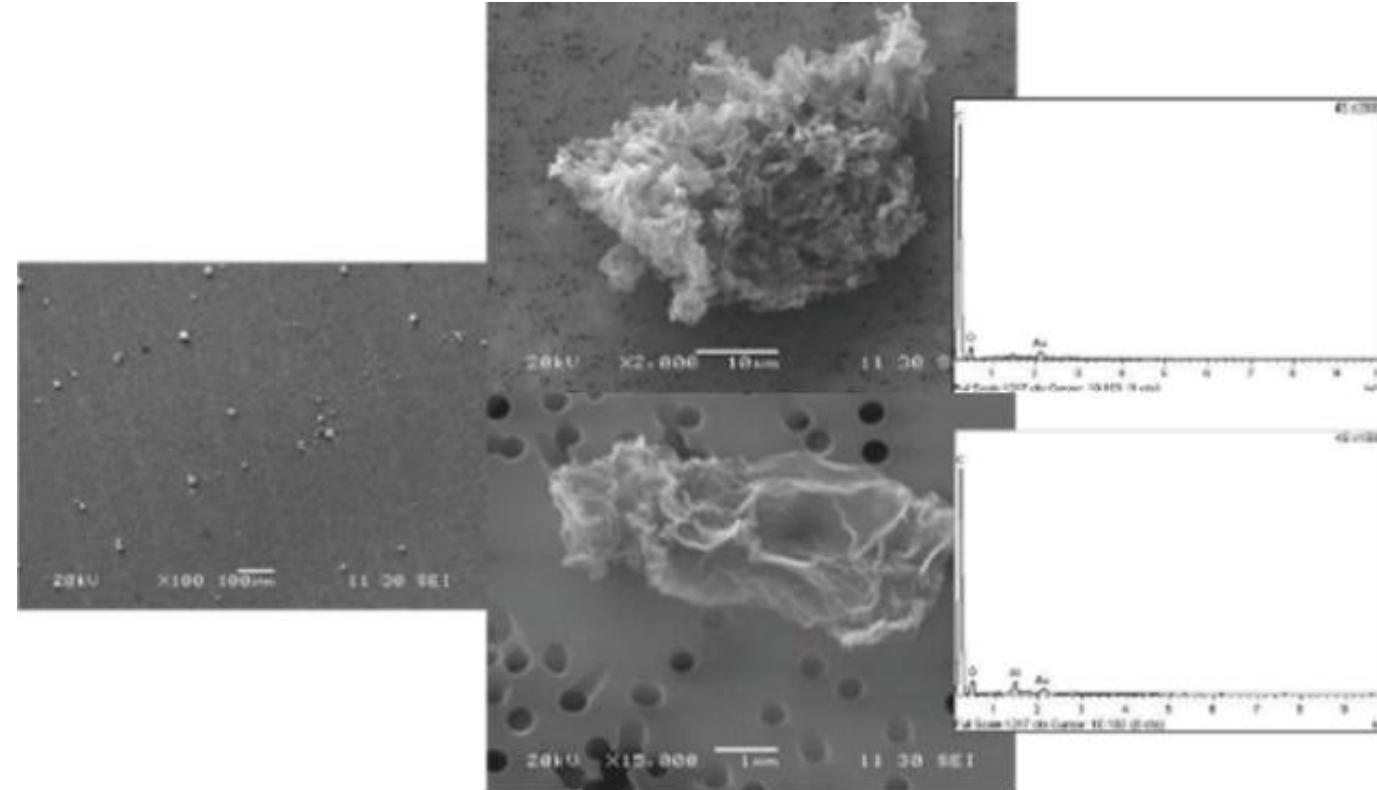
GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

SEM
T1 y T2
T3 y T4

TEM
T1 personal
T1 dentro cabina



SEM Muestra personal (T1 y T2)



CONCLUSIONES

Presencia de partículas respirables con
composición química idéntica a la del NM
investigado.

Escenario de exposición	Masa (mg/m ³)	SEM/TEM + EDX	Diferencia significativa $M_{act} > M_{bgr} + 3 SD_{bgr}$			Conclusión (probabilidad de exposición por actividad con NM)
			CPC	OPS	DiSCmini	
T1- Trasvase y pesada CON EXTRACCIÓN (cabina recirculación)	< LD	Aglomerados TEM	No	No	No	Possible / no se excluye
T2- Trasvase SIN EXTRACCIÓN (cabina con salida al exterior)	< LD	Aglomerados SEM	Sí	Sí	Sí	Probable
T3- Apertura de bolsa SIN EXTRACCIÓN	< LD	Aglomerados SEM	No	No	No	Possible / no se excluye
T4- Limpieza CON EXTRACCIÓN	< LD	No hay presencia	No	No	No	Improbable

Medida de control recomendada

- Usar CSB clase II o cabina diseñada para NM.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

CASO PRÁCTICO 2

Fabricación aditiva: WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)



Metal	%
Cr	19,8
Fe	11
Ni	9,2
Mn	1,8



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

ESTRATEGIA DE MEDICIÓN



Cr, Fe, Mn, Ni



Cr (VI)

ZONA TRABAJO



TEM

FUENTE



Mn Ni

TEM

FONDO

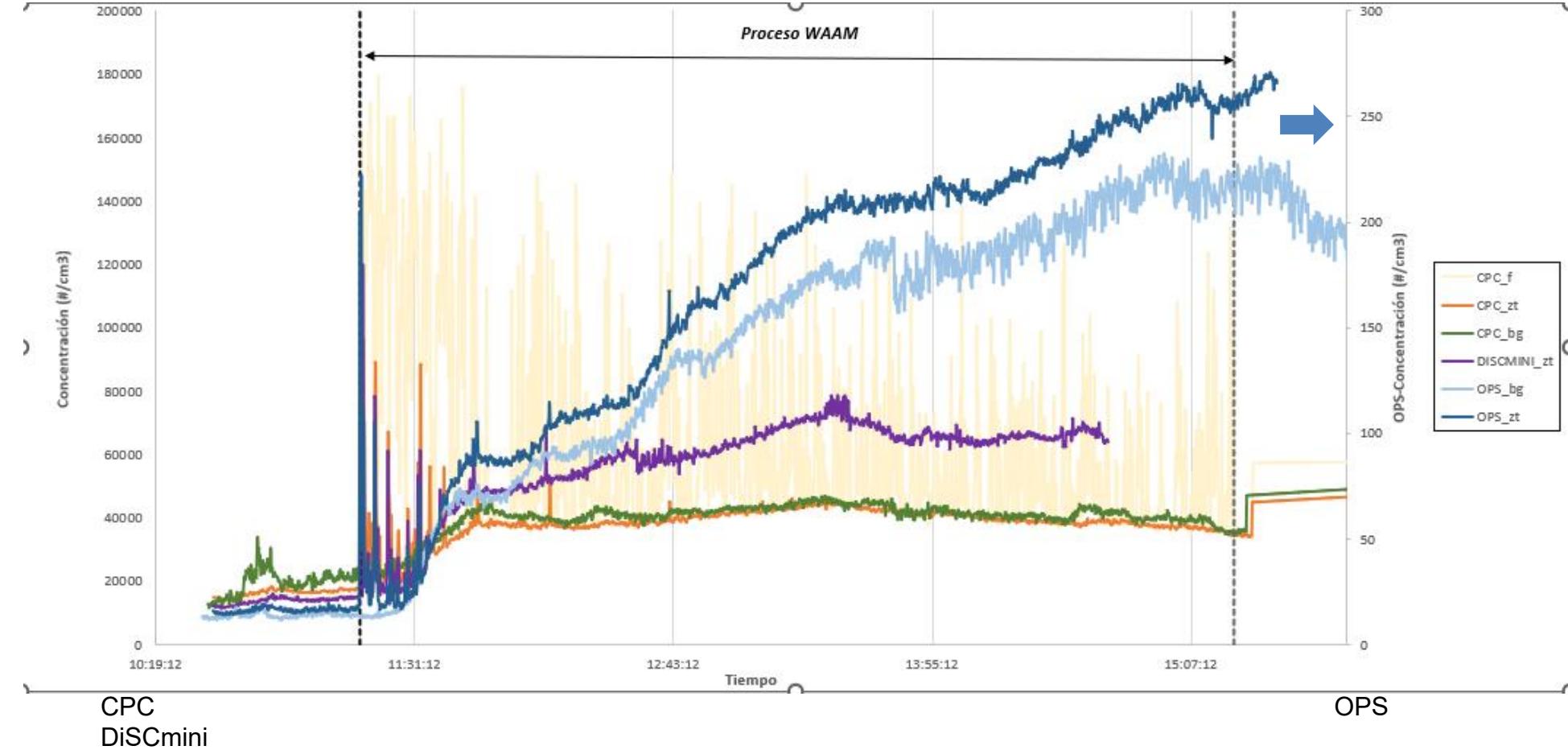


TEM



CASO PRÁCTICO 2

Fabricación aditiva: WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)



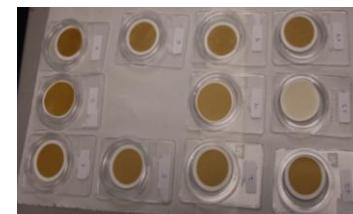


GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

ANÁLISIS QUÍMICO

Metal	Concentración (mg/m ³)							
	Fuente		Personal		Zona de trabajo		Fondo	
	Inh.	Resp.	Inh.	Inh.	Resp.	Inh.	Resp.	
Cr	0,017		0,012	0,013		0,012		
Fe	0,054		0,055	0,054		0,047		
Ni	0,012	0,013	0,009	0,008	0,009	0,008	0,002	
Mn	0,018	0,016	0,013	0,014	0,015	0,012	0,004	
Cr (VI)	0,0009		0,0004	0,0006		0,0006		

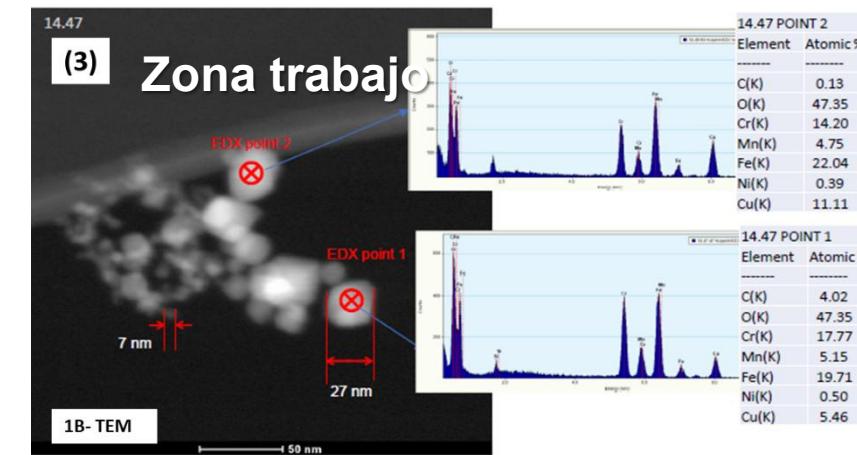
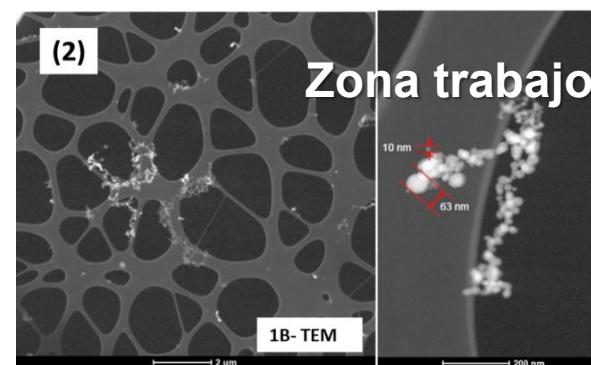
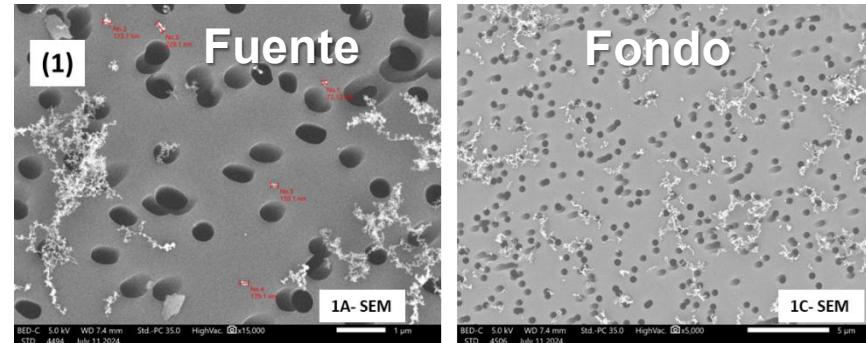




CASO PRÁCTICO 2

Fabricación aditiva: WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA





CONCLUSIONES

Presencia de partículas respirables con composición química idéntica a la del material utilizado.

Escenario de exposición	Masa (mg/m ³)	SEM/TEM + EDX	Diferencia significativa $M_{act} > M_{bgr} + 3 SD_{bgr}$			Conclusión (probabilidad de exposición por actividad)
			CPC	OPS	DiSCmini	
Proceso WAAM	Cr, Mn, Fe, Ni y Cr (VI) en fuente, muestra personal, zona de trabajo y fondo. (Fracción respirable)	Aglomerados de nanopartículas de Cr, Mn, Fe y Ni en fuente, zona de trabajo y fondo.	Sí ⁽¹⁾	Sí ⁽¹⁾	Sí ⁽¹⁾	Probable

⁽¹⁾ Considerando fondo temporal.

Medida de control recomendada

- Encerramiento del proceso.
- Extracción localizada.



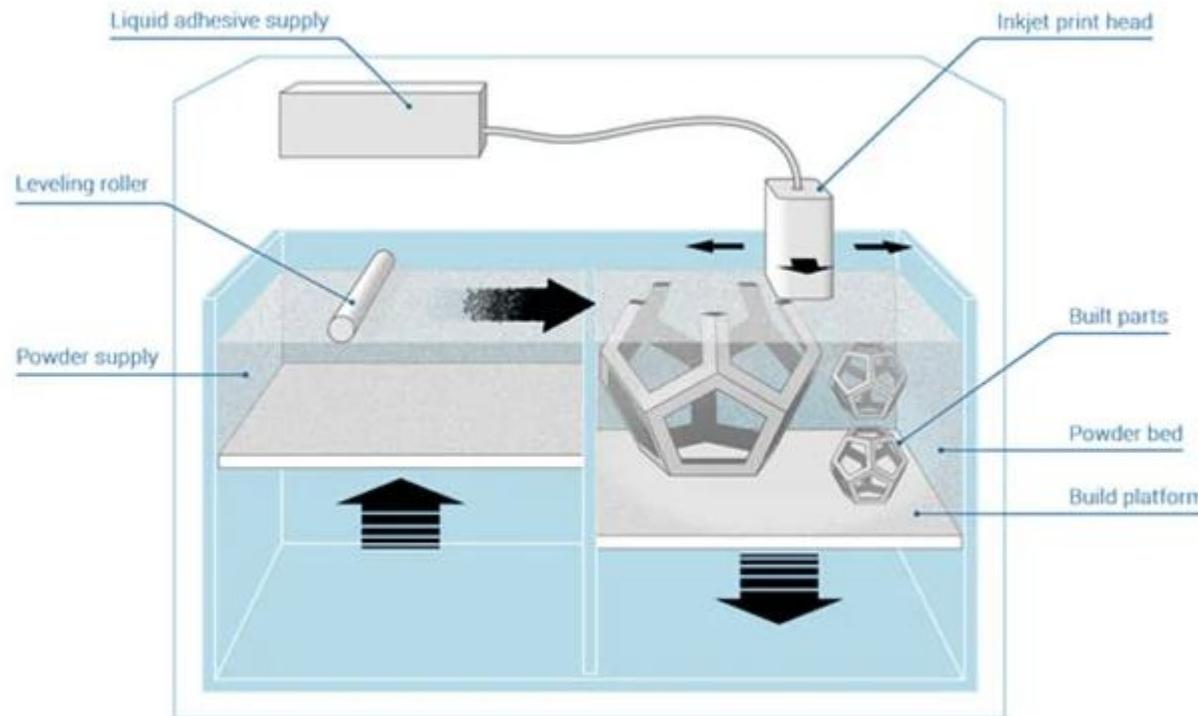
Conformidad del nivel de exposición con el VLA

Metal	Muestra personal (mg/m ³)	Zona de trabajo (mg/m ³)	VLA (mg/m ³)	Conc. / VLA
Fe	0,055		1	0,055
Cr	0,012		2	0,006
Mn (inh.)	0,013		0,2	0,065
Mn (resp.)		0,015	0,05	0,300
Ni (inh.)	0,009		0,05	0,180
Ni (resp.)		0,009	0,01	0,900
Cr (VI)	0,0004		0,005	0,08



CASO PRÁCTICO 3

Fabricación aditiva: Binder Jetting





GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

CASO PRÁCTICO 3

Fabricación aditiva: Binder Jetting



Filtrar el polvo metálico



Rellenar tolva



Impresión



Desmoldeo

Metal	%
Ni	50 -75
Cr	≤ 10
Al	≤ 10
Co	≤ 10

$$D_{10} = 9 \mu\text{m}$$

$$D_{50} = 27 \mu\text{m}$$

$$D_{90} = 50 \mu\text{m}$$



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

ESTRATEGIA DE MEDICIÓN



Co, Cr, Ni



AI

ZONA TRABAJO



TEM

FONDO

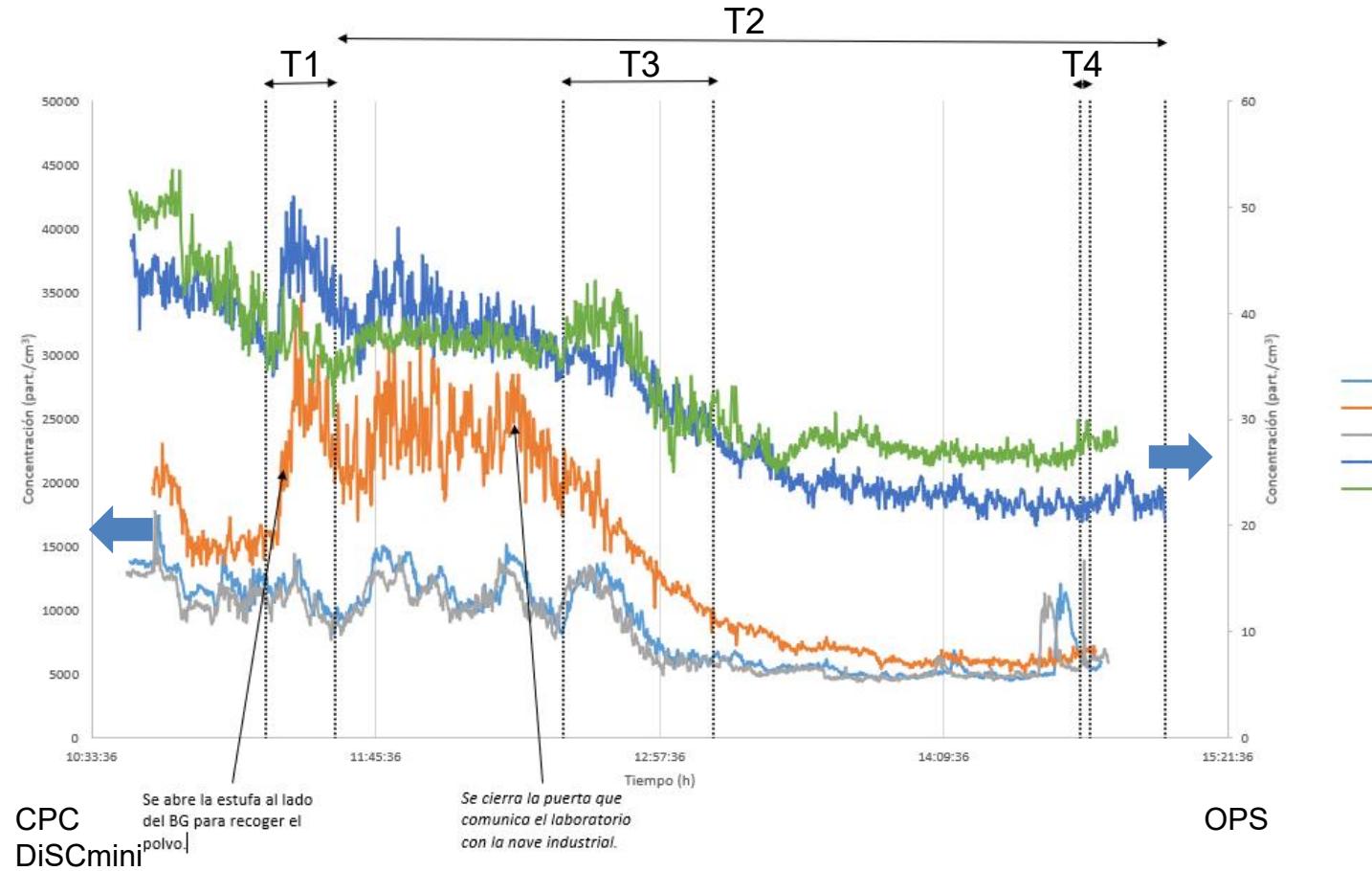


TEM



CASO PRÁCTICO 3

Fabricación aditiva: Binder Jetting



T1- Filtrar, rellenar tolva, preparar lecho
T2- Impresión
T3- Desmoldeo, rellenar tolva, limpiar
T4- Rellenar tolva



ANÁLISIS QUÍMICO

Metal	Concentración (mg/m ³)					
	Personal		Zona de trabajo		Fondo	
	Inh.	Resp.	Inh.	Resp.	Inh.	Resp.
Co	0,011		0,001		< LOQ	
Cr	0,011		0,002		< LOQ	
Ni	0,082		0,011		< LOQ	
Al		0,0006		< LOQ		< LOQ

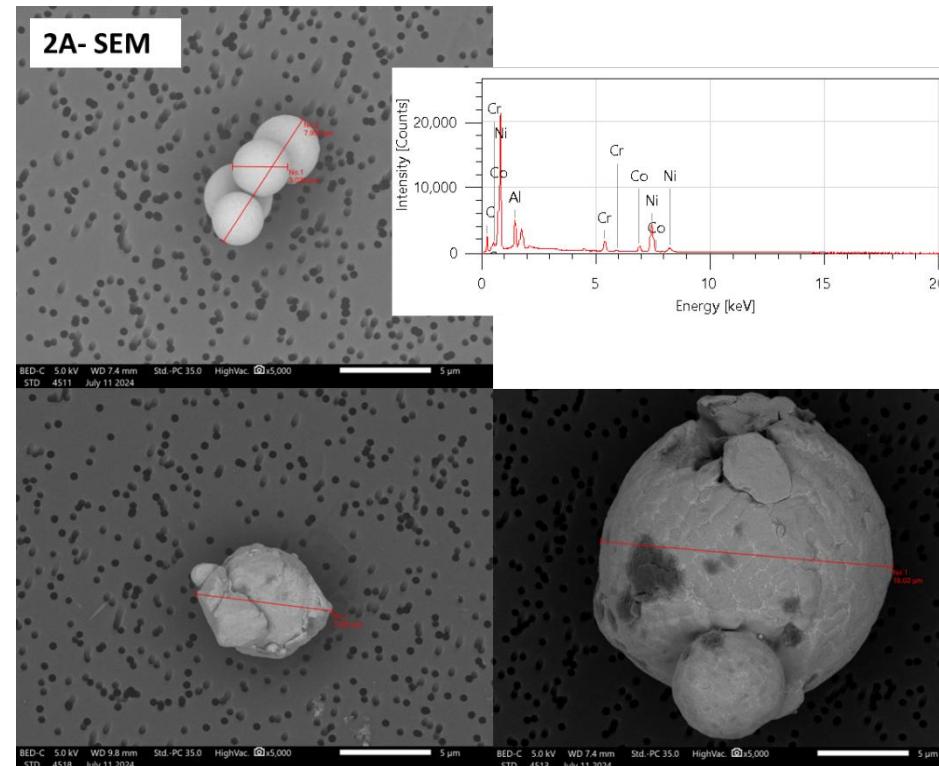
LOQ: 0,5 µg/filtro



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRABAJO
Y ECONOMÍA SOCIAL

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA





CONCLUSIONES

Presencia de partículas respirables con composición química idéntica a la del material utilizado.

Escenario de exposición	Masa (mg/m ³)	SEM/TEM + EDX	Diferencia significativa $M_{act} > M_{bgr} + 3 SD_{bgr}$			Conclusión (probabilidad de exposición por actividad)
			CPC	OPS	DiSCmini	
Proceso Binder Jetting	Al, Cr, Co y Ni en la muestra personal y zona de trabajo. (Fracción inhalable)	Aglomerados de partículas micrométricas (> 7 µm) de Al, Cr, Co y Ni en la zona de trabajo.	No	No	No	Improbable



Conformidad del nivel de exposición con el VLA

Metal	Muestra personal (mg/m ³)	VLA (mg/m ³)	Conc./VLA
Co	0,011	0,02	0,550
Cr	0,011	2	0,006
Ni	0,082	1	0,082
Al	0,0006	1	0,001

Medida de control recomendada

- Optimizar el procedimiento.
- Automatización del proceso.



CONCLUSIONES: Medición y evaluación de la exposición a NM

- Si hay un **VLEP específico**, se aplica la legislación nacional: **UNE-EN 689**.
- Si no lo hay: UNE-EN 17058:2022 propone una estrategia de evaluación en 3 niveles:
 - Nivel 1
 - Determinar el **potencial de liberación y emisión del NM** al ambiente de trabajo.
Métodos cualitativos/sensores.
 - Nivel 2
 - Determinar si hay **indicación de exposición**.
Mediciones con equipos portátiles de lectura directa y/o muestreadores.
 - Nivel 3
 - Determinar la **exposición individual**.
Mediciones con equipos de lectura directa y muestreadores.
- Estrategia de medición:
 - ¿Hay presencia del NM objeto de estudio en tamaño micro?
 - ¿Hay emisión de partículas nanométricas generadas en procesos secundarios?
 - **Equipos portátiles de lectura directa + Muestreadores para análisis químico y/o SEM/TEM.**