

NTP 731: Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (I): aspectos generales

Évaluation de l'exposition professionnelle a aerosols. Generalités
Occupational exposure assessment to aerosols. General aspects

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

Redactor:

Antonio Martí Veciana
Ldo. en Ciencias Químicas y Farmacia

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

En esta Nota Técnica de Prevención se exponen los aspectos más importantes de las Normas UNE-EN 481, UNE-EN 13205 y UNE-482, y de la guía CEN/TR 15230, en relación con la evaluación de la exposición laboral a aerosoles. El conocimiento de los aspectos que se resaltan de las mismas es fundamental para un enfoque técnicamente correcto de dicha evaluación.

Introducción

Los efectos para la salud relacionados con la exposición a un aerosol, son función de una serie de factores: sus **características físicas** (líquido-nieblas o sólido-humopolvo o fibras); sus **características químicas** (solubilidad en agua y reactividad); su **concentración ambiental**; y, finalmente, aunque no el menos importante, el **tamaño de las partículas**.

Referente al estado físico, cabe decir que es tal vez el factor menos relevante, si bien puede afectar a la distribución de tamaños de las partículas, siendo las nieblas de composición más homogénea que los aerosoles sólidos. En cuanto a éstos, es fundamental su definición como polvo o como fibras, ya que estas últimas tienen descritas características de peligrosidad específicas en las que intervienen de manera determinante su forma, tamaño, composición química y persistencia en el aparato respiratorio. En la práctica, se considera que, definido el concepto de fibra, es el número de fibras que pueden penetrar en el sistema respiratorio el que determina, finalmente, la peligrosidad de la exposición. En el caso de los aerosoles sólidos de materiales no fibrosos, son su solubilidad, tamaño y concentración ambiental (en masa) los factores determinantes de la peligrosidad.

En general, cuando se habla de materia particulada o simplemente de polvo, se suele hacer referencia a los aerosoles sólidos insolubles en agua. Los aerosoles constituidos por material soluble se considera que pueden penetrar en el organismo en cualquier punto del sistema respiratorio, sin necesidad de llegar a la zona alveolar, ya que por disolución en el líquido que recubre la mucosa respiratoria, pueden atravesarla y llegar fácilmente a los capilares sanguíneos y a la sangre. En cambio, los aerosoles insolubles sufren una discriminación por el tamaño de las partículas, depositándose a lo largo del tracto respiratorio y llegando a la zona alveolar solamente las partículas más pequeñas. Las de menor tamaño incluso pueden presentar un comportamiento similar a las moléculas y ser eliminadas por exhalación por la misma vía de entrada.

Cabe resaltar finalmente que la proporción de materia particulada real que se inhala también depende, además de las propiedades de las partículas ya apuntadas, de la velocidad y dirección del aire próximo a la persona expuesta, de la cadencia respiratoria de la misma y de si la inhalación es a través de la nariz o de la boca.

Fracciones por el tamaño de las partículas. Norma UNE-EN 481

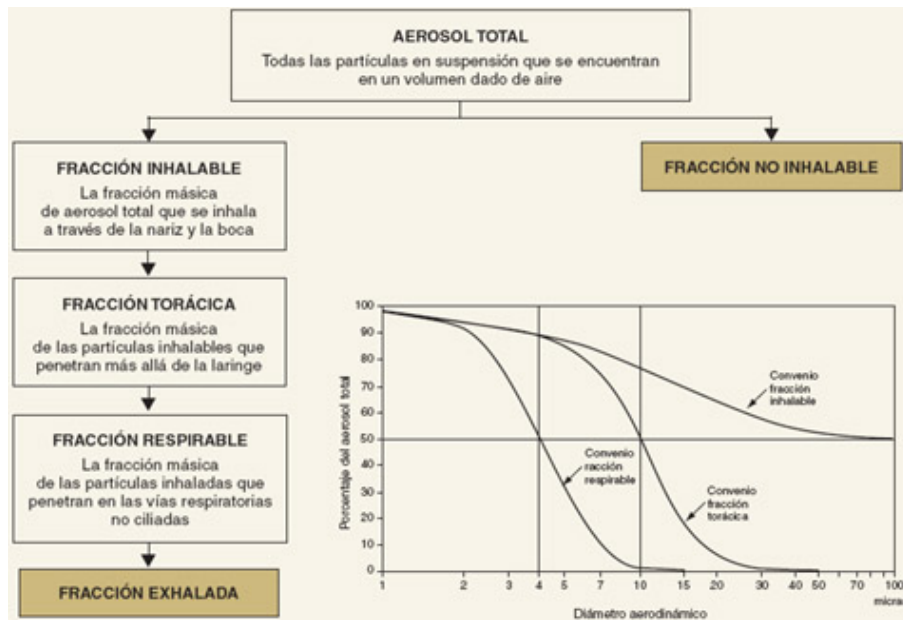
A pesar de la variabilidad interindividual comentada, en lo que respecta a la probabilidad de inhalación de las partículas, se han definido convenios para llevar a cabo el muestreo selectivo de las partículas según el tamaño recogidos en la norma EN 481 "**Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles**".

Esta norma europea aprobada por el CEN (Comité Europeo de Normalización) en 1993 y publicada posteriormente en España como norma UNE-EN 481 en enero de 1995, definió los convenios para el muestreo de las fracciones de partículas según su tamaño, que se recogen en las atmósferas de los lugares de trabajo, con el fin de evaluar los posibles efectos sobre la salud humana que resulten de la inhalación de aerosoles. La American Conference of Governmental Hygienists (ACGIH) y la Internacional Organization for Standardization (ISO), habían ya adoptado idénticos convenios.

Estos convenios, son en realidad relaciones entre el diámetro aerodinámico de las partículas y las fracciones o porcentajes del aerosol total que han de ser recogidas o medidas, que son, en definitiva, las fracciones que penetran en condiciones medias en las distintas regiones del tracto respiratorio (véase Fig. 1). El diámetro aerodinámico se define como diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm³ que tiene la misma velocidad de sedimentación. Las definiciones completas de todas las fracciones que se especifican en la Norma están recogidas en la NTP n° 583.

La norma permite comparar la concentración másica de las fracciones del aerosol con los valores límites ambientales establecidos, aunque no es aplicable a fibras, ya que éstas vienen definidas en términos de longitud y diámetro. La norma posibilita la utilización de otros métodos, siempre que den lugar a conclusiones semejantes o de un mayor rigor.

Figura 1
Definiciones y representación gráfica de los convenios para las fracciones: inhalable, torácica y respirable



Los convenios establecidos en la Norma UNE-EN 481 se basan en la formulación de aproximaciones e hipótesis y lógicamente presentan algunas limitaciones como las que a continuación se resaltan:

- A. La fracción inhalable depende del movimiento del aire (velocidad y dirección), de la cadencia respiratoria y de si la respiración es a través de la nariz o de la boca. Para establecer los valores del convenio se ha considerado una cadencia respiratoria representativa y se han promediado todas las direcciones del viento. El convenio se ajustaría a la realidad en el caso de un individuo que estuviera expuesto uniformemente a todas las direcciones del viento, o de forma predominante al viento lateral o desde atrás.
- B. La definición de fracción inhalable no considera para el polvo inhalable los tamaños de partículas superiores a las 100 microm o las velocidades de viento superiores a los 4 m/s. La fracción inhalable se interrumpe bruscamente para las partículas de 100 microm de diámetro aerodinámico o superiores y por tanto puede subestimarse la fracción de partículas más grandes que se inhala, en el caso de exposiciones cara al viento, especialmente para velocidades del aire superiores a los 4 m/s.
- C. El convenio considera la fracción que penetra y llega a una determinada región del tracto respiratorio, más que la fracción o partículas que realmente se depositan. En la práctica, parte de las partículas muy pequeñas que deberían depositarse en las vías respiratorias no ciliadas, pueden ser exhaladas, aunque como masa total tendrán poca relevancia.

Desde un punto de vista práctico y a pesar de las limitaciones, estos convenios han resultado muy útiles a la hora de establecer las especificaciones que deben alcanzar los equipos de muestreo para cada una de las fracciones de partículas. Es necesario, por tanto, que los equipos o instrumentos que se utilicen para el muestreo, estén de acuerdo con el convenio apropiado a la región del tracto respiratorio en donde se deposite la materia particulada que puede dar lugar a un efecto biológico. Para el muestreo pueden utilizarse equipos que capten, de acuerdo con los convenios establecidos, las distintas fracciones de aerosoles, individualmente o varias fracciones simultáneamente.

Equipos de muestreo de aerosoles: Norma UNE-EN 13205

Muchos han sido los equipos que se han venido utilizando rutinariamente a lo largo de años para el muestreo de las partículas ambientales con el propósito de establecer la exposición ambiental o bien para determinar la eficacia de las medidas de control del polvo, sin que, en muchos casos hubieran sido adecuadamente estandarizados o validados.

La norma europea "*Evaluación del funcionamiento de los instrumentos para la medición de concentraciones de aerosoles*"; aprobada por el CEN en 2001 y publicada en España como norma UNE-EN 13205 (junio del 2002), especifica los métodos para el ensayo de los instrumentos de muestreo de aerosoles, en unas determinadas condiciones de laboratorio, así como los requisitos de funcionamiento que son específicos para los instrumentos que muestrean aerosoles. A continuación se resumen algunos de los aspectos más interesantes de la misma.

Términos y definiciones

- **Concentración ambiental de un aerosol:** Concentración de las partículas del aerosol presentes en el aire antes que las partículas se vean afectadas por la presencia del muestreador o, en caso de un muestreador personal, por la presencia de la persona que porta el muestreador.
- **Muestreador (o instrumento de muestreo):** Aparato para separar las partículas del aerosol de su gas portador (normalmente aire).
- **Eficacia de entrada (o del orificio de entrada) del muestreador.** Es la relación entre la concentración del aerosol que pasa a través del sistema de entrada del muestreador, y la correspondiente concentración ambiental del aerosol, para cada diámetro aerodinámico de las partículas.
- **Eficacia de muestreo:** Es la relación entre la concentración del aerosol recogida, para su medición, por el proceso de muestreo y la correspondiente concentración ambiental del aerosol, para cada diámetro aerodinámico de las partículas.
- **Eficacia de separación:** Es la relación entre la eficacia de muestreo y la eficacia de entrada, para cada diámetro aerodinámico de las partículas.
- **Muestreador de referencia (en comparaciones de muestreadores):** Muestreador que se ha ensayado previamente utilizando los métodos descritos en la Norma UNE-EN 13205 (Anexo A) y cuya exactitud se estima inferior o igual al 30 %, en las condiciones ambientales de la comparación.
- **Instrumento a evaluar (en comparaciones de muestreadores):** Cualquier clase de instrumento para el muestreo, que puede utilizarse para medir la concentración de las partículas de aerosol, y cuyo funcionamiento es el que se va a determinar.
- **Función de corrección:** Función matemática que relaciona la concentración de un aerosol medida con el instrumento a evaluar con la medida utilizando un muestreador de referencia, determinada por comparación de los dos instrumentos.

Métodos de ensayo de los muestreadores

La norma referencia los principales factores que pueden influir en el funcionamiento de los muestreadores de aerosoles, así como las principales variables conocidas que influyen en los mismos y ejemplos de los tipos de muestreadores que pueden verse afectados. Todo ello se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1
Factores principales que influyen en el funcionamiento de los muestreadores de aerosoles

FACTOR	NATURALEZA DEL EFECTO	MUESTREADORES AFECTADOS
Tamaño de las partículas	Selección de las partículas en función del tamaño	Todos los tipos de muestreadores
Velocidad del viento	La velocidad del viento en el orificio de entrada influye en la aspiración, especialmente para valores elevados y para partículas grandes	Cualquier muestreador que no tenga un orificio de entrada isocinético
Dirección del viento	La orientación del viento en el orificio de entrada influye en la aspiración	Cualquier muestreador que no tenga un orificio de entrada tipo omnidireccional
Composición aerosol	Rebote y re-arrastre de las partículas; ruptura de los aglomerados	Por ejemplo, los ciclones, los impactadores
Masa de aerosol muestreada	La eficacia de recogida del aerosol varía en las superficies muy colmatadas.	Por ejemplo, los filtros de espuma porosa
Carga de aerosol	Atracción o repulsión de las superficies	Todos los muestreadores, en particular los no conductores
Variabilidad de las muestras	Una diferencia dimensional pequeña produce un efecto aerodinámico grande	Por ejemplo, los ciclones, los impactadores
Variación del caudal	El mecanismo de separación de las partículas depende fuertemente del caudal	Por ejemplo, los ciclones, los elutriadores, los impactadores

Además de las variables mencionadas en la tabla, también deberán tenerse en cuenta los potenciales efectos de la temperatura, la presión, la humedad, las vibraciones, etc., así como la posibilidad de interacción entre el caudal del aire y la velocidad del aire exterior (si la caída de presión a través del muestreador es pequeña) o bien la capacidad del orificio de entrada del muestreador para recoger partículas que van en su dirección o que se sedimentan en él.

Los requisitos de funcionamiento de los muestreadores, que incluyen la conformidad con los convenios de muestreo dados en la norma UNE-EN 481:1995, solo son de aplicación en el proceso de muestreo de las partículas suspendidas en el aire y no en el proceso analítico de las partículas muestreadas. Los requisitos relativos al funcionamiento del proceso de medición de las partículas muestreadas se contemplan en la Norma UNE-EN 482:1995 de la que se hablará más adelante y también están recogidos en la NTP 583.

Para evaluar el funcionamiento de un muestreador, normalmente es necesario analizar las muestras recogidas durante el ensayo. No obstante la norma UNE-EN 13205 asegura que, durante el ensayo, los errores de carácter analítico (factores relacionados con el sesgo, la precisión y el límite de detección del método analítico) se mantienen muy bajos y no contribuyen significativamente al resultado final.

La Norma es de aplicación a todos los instrumentos utilizados en los muestreos de partículas en los lugares de trabajo, cualquiera que sea su modo operativo, e incluye distintos procedimientos de ensayo y tipos de evaluación para que pueda aplicarse a una amplia

variedad de muestreadores. Va dirigida tanto a los fabricantes de los equipos de muestreo (véanse anexos A, B, y D), como a sus usuarios (véanse anexos C y E); los primeros, para llevar acabo la validación y los segundos, para su evaluación con respecto a las normas UNE-EN 481 y UNE-EN 482.

El fabricante del muestreador tiene la responsabilidad de informar al usuario del mismo del funcionamiento en las condiciones de laboratorio especificadas en la norma UNE-EN 13205:2002, mientras que el usuario tiene la responsabilidad de asegurarse que el muestreador cumple con los requisitos de la incertidumbre global, que se especifican en la norma UNE-EN 482:1995, en las condiciones reales de utilización.

Anexos

A continuación se resumen los aspectos más destacables de los anexos A, B, C, D y E, de la norma y que son de interés para los fabricantes de muestreadores y/o los potenciales usuarios de los mismos.

• Anexo A: Ensayos de laboratorio de los muestreadores

Los ensayos de laboratorio con un muestreador tienen por objeto determinar la eficacia del muestreo en función del diámetro aerodinámico de las partículas en el intervalo de tamaño de interés, comparar los valores de la eficacia obtenidos con los establecidos en los convenios (norma UNE-EN 481) para el muestreo, y estimar el sesgo y la precisión.

Especifica un método de ensayo de laboratorio para determinar en que grado el instrumento de muestreo está de acuerdo con lo establecido en el convenio. Los experimentos diseñados están dirigidos a determinar la eficacia de muestreo en función de muchas variables, tales como: el diámetro aerodinámico de las partículas en el intervalo de tamaños de interés (fracción inhalable: 1100 μm , fracción torácica: 0,1-35 μm y fracción respirable: 0,1-15 μm), la velocidad del viento (0-1 m/s en trabajos interiores y 0-4,0 m/s en el interior o exterior de los lugares de trabajo), la dirección del viento (promedio de todas las direcciones), la composición del aerosol (fase sólida y/o líquida), la aglomeración del aerosol, la masa muestreada, la carga del aerosol, la variabilidad entre las muestras (grupo a ensayar de al menos 6 muestras), las variaciones de caudal ($\pm 5\%$) y las superficies de recogida de partículas (filtros, espumas, etc.).

• Anexo B: Comparación de muestreadores en el laboratorio

Detalla los procedimientos para comparar en el laboratorio los resultados del equipo de muestreo a evaluar con un muestreador de referencia, expuestos a los mismos aerosoles de ensayo (en túneles de viento o en cámaras de aerosoles). Los ensayos se repiten en las condiciones específicas de aplicación práctica del muestreador a evaluar y se comparan las concentraciones medidas en ambos, debiendo los resultados concordar dentro de los límites especificados.

En esta comparación no se determina la curva de eficacia del equipo de muestreo a evaluar, por lo que las características del equipo solo son comparadas indirectamente con los convenios para el muestreo establecidos en la norma UNE-EN 481 y, por lo tanto, no puede calcularse la exactitud o la incertidumbre global del instrumento para otras distribuciones de tamaños del aerosol que no se hayan estudiado en los ensayos realizados.

• Anexo C: Procedimiento recomendado para la comparación de muestreadores en campo

Describe un procedimiento para establecer la equivalencia entre dos métodos de medición de la concentración de un aerosol en un lugar de trabajo y obtener una función de corrección que relacione las concentraciones del aerosol, medidas con el equipo a evaluar, con las medidas con el muestreador de referencia. No es aplicable en comparaciones entre equipos de muestreo personales y equipos estáticos o viceversa, ya que debe tratarse de equipos de la misma naturaleza.

El procedimiento va dirigido más al usuario que al fabricante, con el objeto de que el usuario pueda utilizar un instrumento de medida de aerosoles no normalizado cuando su equivalencia con los muestreadores de referencia se lleve a cabo a través de un ensayo normalizado. Ello le posibilita hacer mediciones para la evaluación aproximada, o mediciones periódicas, de la concentración de polvo, con instrumentos que no se han evaluado en ensayos de laboratorio según esta norma.

Como la función de corrección depende tanto de las propiedades del aerosol ensayado (composición, distribución de tamaños, carga, etc.), como de las condiciones ambientales existentes en el momento del ensayo (temperatura, presión, velocidad del viento, etc.), esta función es específica de las actividades laborales incluidas en el ejercicio de comparación y no puede darse por supuesto que también sean aplicables en otras condiciones.

• Anexo D: Ensayos de manipulación y transporte de muestreadores

Describe un procedimiento de ensayo para evaluar la aptitud para el uso de los muestreadores de aerosoles y los potenciales errores que pueden introducirse en la manipulación y el transporte de las muestras. Las manipulaciones bruscas o inadecuadas pueden provocar desplazamientos de las partículas recogidas en el medio de captación (filtro, espuma, etc.) hacia las paredes internas del equipo y en el caso de muestreadores de multifracciones, contaminaciones de las fracciones de partículas finas con las partículas más gruesas.

• Anexo E. Cálculo de la incertidumbre global

Aunque este cálculo no forma parte propiamente del objeto y campo de aplicación de la Norma, en este Anexo se expone el método para conocer la incertidumbre global del proceso de medición del aerosol combinando los errores de muestreo y analíticos, para que la evaluación esté de acuerdo con los requisitos de la norma UNE-EN 482. Para contrastar el método de muestreo con los requisitos generales de funcionamiento es necesario tener en cuenta el proceso de medición completo, por lo que será preciso conocer o estimar el sesgo y la precisión tanto del análisis como del muestreo para poder calcular la incertidumbre global de la medición.

Requisitos y fiabilidad de los procedimientos para la medición de aerosoles

La norma UNE-EN 482:1995 contiene los requisitos generales de funcionamiento de los procedimientos utilizados para determinar las concentraciones de los agentes químicos en las atmósferas de los lugares de trabajo. Estos requisitos son de aplicación cualquiera que sea la naturaleza química o estado físico del agente químico e independientemente del método de muestreo o de análisis utilizado, por tanto es totalmente de aplicación en el caso de la medición de aerosoles, siendo aplicable en todas las etapas del procedimiento de medida, incluyendo el transporte y el almacenamiento de las muestras. Los resultados combinados del muestreo de las partículas suspendidas en el aire y del análisis de las partículas recogidas, permiten evaluar el funcionamiento de los métodos para la medición de los aerosoles por medio de la combinación de los errores del análisis y del muestreo. Los requisitos de funcionamiento que especifica la Norma incluyen los valores máximos de la incertidumbre global (combinación de la precisión y del sesgo) alcanzable por el método, en determinadas condiciones de laboratorio. Ver la NTP 583.

La Guía para el muestreo de las distintas fracciones de los aerosoles CEN/TR 15230:2005, - "*Guidance for sampling of inhalable, thoracic or respirable aerosol fractions*", elaborada y publicada por el Comité Técnico del grupo CEN, trata de diversos aspectos sobre el muestreo: la estrategia, la eficacia del método, los equipos de muestreo, los equipos auxiliares, y los procedimientos de muestreo y análisis. Incluye también ejemplos de los muestreadores disponibles en el mercado que satisfacen potencialmente los requerimientos de las Normas UNE-EN 482 y UNE-EN 13205.

En el apartado sobre la eficiencia del método se puntualizan algunos aspectos analíticos relacionados con la fiabilidad de los procedimientos de medición de los aerosoles que, por su interés, se exponen a continuación.

Límite de detección

Los límites de detección y de cuantificación de la medición dependen del volumen de aire muestreado y del método analítico utilizado para cuantificar el polvo muestreado utilizando los instrumentos de muestreo indicados en la guía.

Sesgo del muestreo

El sesgo del muestreo proviene, fundamentalmente, de dos fuentes:

- a. La concentración a que está expuesto el muestreador no es necesariamente la misma a la que está expuesta la persona. Este problema es difícil de resolver, especialmente en el caso del polvo inhalable, ya que las partículas más grandes no están uniformemente distribuidas y son producidas, generalmente, por fuentes muy localizadas en los puestos de trabajo. El sesgo puede ser minimizado asegurando la colocación del muestreador en la *zona respiratoria del trabajador*.
- b. Los muestreadores que se relacionan en la Guía han demostrado, para un razonable margen de condiciones, su concordancia con las especificaciones y requerimientos establecidos en la Norma UNE-EN 13205. No obstante, no existen equipos disponibles que se ajusten claramente a las especificaciones establecidas en la Norma EN-UNE 481 si se toman en consideración todas las condiciones posibles de los lugares de trabajo.

Precisión del muestreo

La principal fuente de imprecisión en la medición de la concentración de polvo en los lugares de trabajo es la falta de uniformidad del aerosol o nube de polvo que rodea al trabajador, en tiempo y en espacio. Por lo general, la precisión tanto del muestreo como la analítica es mejor en comparación con la que se deriva de la falta de uniformidad del ambiente.

En estudios efectuados colocando dos muestreadores en cada trabajador para determinar la precisión real en los muestreos de polvo, en el caso de la fracción inhalable, se ha encontrado que los resultados de las muestras, tomadas al mismo tiempo en el mismo trabajador, se han llegado a diferenciar entre sí hasta un factor de 2, con un 95 % de probabilidad. En el caso de las fracciones de polvo torácico o respirable las partículas son más pequeñas y más uniformemente mezcladas en el puesto de trabajo y la precisión de sus mediciones suele ser, generalmente, mayor.

Sesgo y precisión analítica

El sesgo analítico y la imprecisión analítica tienen generalmente (con adecuados controles de calidad en el laboratorio), un menor impacto sobre los errores en la medición de la concentración de las partículas ambientales, comparativamente con la variabilidad que presentan por sí mismos los aerosoles en un mismo puesto de trabajo. Incertidumbre expandida

Los instrumentos de muestreo, de acuerdo con la norma UNE-EN 13205, deben tener una exactitud mejor o igual al 30 %. No obstante, debe tenerse en consideración que la incertidumbre global o expandida de todo el procedimiento de medición, es una combinación de todas las incertidumbres (del instrumento de muestreo, del volumen de muestreo, de la fracción muestreada, del transporte, del almacenamiento, de la preparación de la muestra y del procedimiento analítico instrumental) y que los valores máximos de la incertidumbre global relativa de los procedimientos de medición, según sea el objeto de la medición, vienen establecidos en la tabla correspondiente de la Norma UNE-EN 482 y están recogidos en la NTP 583. La medición de la concentración será una buena estimación de la concentración real a la que está expuesto el trabajador cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- el muestreador utilizado cumpla los requerimientos de la norma UNE-EN 13205,
- el muestreador haya sido correctamente ubicado en el trabajador,
- el tiempo de muestreo corresponda o sea representativo del tiempo de exposición, y
- el transporte, el almacenamiento y los métodos analíticos utilizados sean apropiados.

Si además se tiene en cuenta que la variabilidad de la concentración del aerosol en el lugar de trabajo (temporal, espacial y personal) excederá, con frecuencia, ampliamente la de los procedimientos de muestreo y análisis, la estrategia de muestreo que se adopte deberá ajustarse a esta gran variabilidad de las concentraciones en los lugares de trabajo y también tener en consideración la incertidumbre que podrá conllevar el resultado de la concentración ambiental calculada.

Bibliografía

1. NORMA UNE-EN 481:1995
Atmósferas en los puestos de trabajo. Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles.
2. NORMA UNE-EN 13205:2002
Atmósferas en el lugar de trabajo. Evaluación del funcionamiento de los instrumentos para la medición de concentraciones de aerosoles.
3. NORMA UNE-EN 482:1995
Atmósferas en el lugar de trabajo. Requisitos generales relativos al funcionamiento de los procedimientos para la medición de agentes químicos.
4. TECHNICAL REPORT CEN/TR 15230:2005
Workplace atmospheres - Guidance for sampling of inhalable, thoracic and respirable aerosol fractions.
5. GUARDINO, X.
Evaluación de la exposición laboral a agentes químicos. Norma UNE-EN 482 y relacionadas.
INSHT, NTP nº 583.