

CONVENIOS PARA LA TOMA DE MUESTRA DE AEROSOL EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LOS MUESTREADORES PARA EL MUESTREO SELECTIVO DE LAS DIFERENTES FRACCIONES: INHALABLE, TORÁCICA Y RESPIRABLE

CONVENIOS PARA LA TOMA DE MUESTRA DE AEROSOLES EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LOS MUESTREADORES PARA EL MUESTREO SELECTIVO DE LAS DIFERENTES FRACCIONES: INHALABLE, TORÁCICA Y RESPIRABLE

AUTORES:

Christian Albornoz V.

Felipe Beriestain H.

Rolando Vilasau D.

Juan Alcaíno L. .

Sección Riesgos Químicos

Departamento de Salud Ocupacional

Instituto de Salud Pública de Chile

CONVENIOS PARA LA TOMA DE MUESTRA DE AEROSOLES EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL MATERIAL PARTICULADO Y SU RELACIÓN CON LOS MUESTREADORES PARA EL MUESTREO SELECTIVO DE LAS DIFERENTES FRACCIONES: INHALABLE, TORÁCICA Y RESPIRABLE

1. INTRODUCCIÓN

Las sustancias químicas están con frecuencia presente en los lugares de trabajo, a veces de forma inadvertida. Dependiendo del proceso productivo en las cuales se generan, podemos encontrar sustancias químicas en forma de aerosoles, gases y vapores, las cuales, dependiendo de su toxicidad, tamaño, concentración, tiempo de exposición, etc. pueden afectar la salud y la vida de los(as) trabajadores(as) que las manipulan directamente o se encuentran en las cercanías de los puntos de emisión. En esta nota técnica tiene como objetivo proveer de información técnica a los profesionales del área de la higiene ocupacional respecto de las características más relevantes que se deben considerar a la hora de seleccionar los muestreadores de material particulado en función del tipo de fracción que se requiere muestrear (inhalable, torácica y respetable).

1.1. Consideraciones Generales

Previamente es importante comprender que existen múltiples factores que influyen en la exposición a un aerosol, como son las características físicas (líquido o sólidos); las características químicas (solubilidad en agua y reactividad); su concentración ambiental, y uno de los factores más importantes: “el tamaño de las partículas”. Al respecto, las sustancias químicas al estar en forma de aerosoles, y dependiendo del proceso productivo que las genera, se pueden presentar en forma de pequeñas partículas medibles de cierta magnitud. Esta característica las diferencia de los gases y vapores, ya que éstos forman dispersiones moleculares. El hecho de estar presente en forma de partículas les confiere a los aerosoles ciertas propiedades particulares que son de importancia desde el punto de vista de la higiene ocupacional, principalmente en lo que respecta a su penetración en el tracto respiratorio y al lugar de disposición final, característica que depende del tamaño de las partículas. Luego, y por esta razón, el parámetro de mayor influencia lo constituye su tamaño, puesto que determina la posibilidad que tiene el aerosol de llegar a los diferentes sectores del sistema respiratorio y causar daño.

Los conocimientos adquiridos a través de diversos estudios toxicológicos y epidemiológicos sobre los mecanismos de penetración y disposición final de las partículas en el tracto respiratorio han revelado la importancia de considerar el tamaño de éstas en el proceso de evaluación de riesgos. Con el paso del tiempo y la evolución de los conocimientos respecto de conceptos iniciales como inhalación y exhalación de las partículas se ha logrado adoptar diferentes convenios y términos para su clasificación. Lo anterior ha permitido la definición de límites permisibles y la fracción de interés que se requiere muestrear (por ejemplo: el Decreto Supremo N° 594, de 1999, del Ministerio de Salud, que aprueba el Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, especifica que el muestreo de sílice libre cristalizada se debe realizar en “Fracción Respirable”).

Actualmente existe un consenso internacional que define los convenios para la toma de muestra selectiva de las fracciones en función del tamaño del material particulado. Este consenso ha permitido que se desarrollen y fabriquen comercialmente muestreadores que recogen selectivamente las fracciones de los aerosoles.

2. AEROSOL EN LOS LUGARES DE TRABAJO

Las sustancias químicas presentes en los lugares de trabajo se pueden encontrar en forma de suspensiones de partículas sólidas o líquidas en el aire, denominadas aerosoles. Desde el punto de vista toxicológico ambos tipos de partículas pueden ser inhalados por los trabajadores(as).

Estos aerosoles pueden presentar una variedad muy amplia de tamaños, los que en general pueden oscilar entre $0,001 \mu\text{m}$ y $100 \mu\text{m}$. De acuerdo con el tamaño, el origen y el estado físico, las partículas pueden designarse con nombres específicos. De esta manera se denomina: polvo (dust) a una suspensión de pequeñas partículas sólidas en el aire producidas por procesos mecánicos de disgregación; niebla (mist), a los sistemas dispersos de gotas formados por condensación de un vapor o por atomización de un líquido; humo (smoke), a las partículas de diámetros inferiores a $0,5 \mu\text{m}$ originadas en los procesos químicos o físicos de combustión, volatilización y condensación, y que tienen una gran tendencia a flocular, y humo metálico que corresponde a la suspensión de partículas sólidas en el aire, generadas por la condensación de un estado gaseoso originado por la sublimación del metal.

3. TAMAÑO DE PARTICULAS DE LOS AEROSOL

Es importante destacar que cualquiera sea la naturaleza, la forma o la granulometría de las partículas en suspensión, estas están sometidas a la acción de la gravedad y su comportamiento queda determinado por la ley de Stokes o de Stokes-Cunningham para las partículas más finas, ley que relaciona la velocidad terminal a las características físicas. Dado lo anterior, es que la cantidad de partículas por volumen de aire cambia con el tiempo producto de la sedimentación de las partículas más grandes, el movimiento browniano y la formación de aglomerados de las partículas más pequeñas. Dado que la velocidad terminal de las partículas pequeñas es muy baja, midiéndose en algunos casos en cm/h y aún, en mm/h , es que las partículas finas pueden permanecer suspendidas en el aire durante largos periodos de tiempo.

Producto de lo anterior, es que el tamaño de las partículas es muy importante puesto que determina en gran medida el comportamiento de éstas en el aire y las leyes físicas que las dominan. Asimismo, determina la localización y extensión del depósito en las vías respiratorias. En este sentido, las partículas inferiores a $5 \mu\text{m}$ pasan los bronquiolos para depositarse finalmente en los alveolos. El tamaño, también influye sobre la solubilidad y consecuentemente sobre la absorción y los efectos tóxicos. Si bien, hay muchos parámetros para definir el tamaño y la forma de las partículas, uno de los más utilizados en el ámbito de la higiene ocupacional es el "diámetro equivalente", que corresponde al diámetro de una esfera que tiene el mismo valor de la propiedad física específica que la partícula irregular. Este parámetro, resulta útil para utilizarlo con dispositivos o instrumentos de medición como filtros, ciclones o impactadores, puesto que, el comportamiento de las partículas en estos dispositivos o instrumentos, también se encuentran dominados por la dinámica de fluidos. La norma UNE-EN 481 define el concepto de diámetro aerodinámico como: "El diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm^3 que tiene la misma velocidad final debida a la fuerza gravitatoria, en el aire en calma, que la que tiene la partícula, bajo las condiciones existentes de temperatura, presión y humedad relativa".

NOTA: la norma UNE-EN 481 especifica que: "Para las partículas de diámetro aerodinámico menor de 0,5 µm, es conveniente utilizar el diámetro de difusión en lugar del diámetro aerodinámico. El diámetro de difusión de una partícula es el diámetro de una esfera con el mismo coeficiente de difusión que el de aquella bajo las condiciones existentes de temperatura, presión y humedad. Relativa".

4. FUNDAMENTO DE LOS CONVENIOS

El proceso de toma de muestra en función del tamaño del material particulado se basa en la experiencia y conocimiento médico-fisiológico del sistema respiratorio humano.

El sistema respiratorio se divide en función de las características anatómicas de depósito y eliminación de las partículas en tres regiones: vías aéreas superiores, región traqueobronquial y región alveolar. Cada una de ellas con características de respuesta diferentes como son: los tiempos de residencia del aire, la capacidad de separación de las partículas y los mecanismos de eliminación.

Una vez que las partículas son inhaladas e ingresan al organismo, estas pueden ser exhaladas o pueden depositarse en alguna zona del tracto respiratorio. Como se ha señalado anteriormente, tanto el comportamiento como la deposición final de las partículas inhaladas dependen principalmente de su naturaleza y tamaño. Otros factores que también influyen en la cantidad de material particulado inhalado son: la velocidad y dirección del viento próximo al trabajador(a) con exposición a este agente, las propiedades de las partículas (composición, carga del aerosol, superficie de contacto), la frecuencia respiratoria y la posibilidad de que la respiración sea a través de la nariz o la boca.

Cabe destacar que nuestro sistema respiratorio cuenta con ciertas defensas para enfrentar el ingreso de material particulado en las diferentes regiones del tracto respiratorio, como son el mecanismo mucociliar, que actúa en las regiones de las vías superiores y traqueobronquial, y el mecanismo de endocitosis, que supone la acción de los macrófagos en la región alveolar. En las vías superiores quedan depositadas las partículas de mayor tamaño, las cuales pueden ser eliminadas mediante el estornudo o deglución. Lamentablemente, no todas las partículas presentan los mismos tiempos de residencia; por ejemplo, hay partículas de mayor tamaño, como las de maderas duras, que pueden residir durante largos periodos de tiempo y con ello causar cáncer nasal.

Si bien hay una gran variabilidad interindividual en la probabilidad de inhalación de partículas, y en la reacción frente al depósito y eliminación de estas, igualmente se han definido convenios para el muestreo selectivo de las partículas según el tamaño. Estos convenios son relaciones entre el diámetro aerodinámico de las partículas y las fracciones del aerosol que han de ser recogidas o medidas por los muestreadores, que representan las fracciones que penetran, bajo condiciones promedio, a las diferentes regiones del tracto respiratorio. Los convenios están expresados en términos de fracciones de masa de las partículas. En este contexto, internacionalmente se han definido cinco fracciones por tamaño de partículas: inhalable, extratorácica, torácica, traqueobronquial y respirable, así como también los respectivos convenios o criterios para la toma de muestra selectiva de estas diferentes fracciones.

Originalmente no existía un criterio único para el muestreo selectivo por tamaño de partículas lo que generaba diferencias significativas entre unos criterios y otros. Producto de lo anterior, es que se propuso una armonización internacional para unificarlos. Al respecto, para la fracción inhalable se propuso que se mantuviera el criterio de la ACGIH (1985), para la fracción torácica se propuso una definición similar a la establecida por la ACGIH (1985) e ISO 7708 (1995), y para la fracción respirable se propuso establecer una nueva definición. Finalmente, consensuada la unificación de criterios de las tres fracciones, cada organismo (ISO: Organización Internacional de Normalización; ACGIH: Conferencia Americana de Higienistas Industriales; CEN: Comité Europeo de Normalización) procedió a publicarlos de forma independiente a través de los siguientes documentos:

- CEN: Norma EN 481: 1993 Atmósferas en los puestos de trabajo. Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles.
- ISO 7708: 1995: Calidad del aire: definiciones de la fracción del tamaño de partícula para el muestreo relacionado con la salud.
- ACGIH: 1995: Threshold Limit Values.

Para la adecuada interpretación de los convenios y con ello poder realizar tomas de muestras confiables, es importante considerar que:

- a) Estos convenios se han desarrollado para evaluar los posibles efectos sobre la salud que ocasiona la inhalación de aerosoles en los lugares de trabajo. Una aplicación de los convenios, es la comparación de la concentración másica de las fracciones del aerosol con los correspondientes límites permisibles.
- b) Los convenios representan la fracción del aerosol que captaría un muestreador en condiciones ideales (de laboratorio) y, por lo tanto, son las especificaciones que deben cumplir los instrumentos de muestreo cuando captan la fracción de interés.
- c) La toma de muestra de aerosoles debe realizarse teniendo en cuenta la fracción para la que está definido el límite permisible.
- d) Los convenios para la toma de muestra de las distintas fracciones no se deben utilizar para comparar con valores límite que estén definidos en términos completamente diferentes. Por ejemplo, no deben ser utilizados con los valores límite para fibras ya que éstas están definidas en función de la longitud y el diámetro de las fibras.

5. ESPECIFICACIONES A CONSIDERAR PARA UTILIZAR LOS CONVENIOS DE FRACCIONES

La norma UNE EN 481, señala que los convenios para el muestreo de material particulado son especificaciones que se deben considerar para los instrumentos de muestreo, para cada diámetro aerodinámico de partículas. A saber:

- Que, para el convenio para la fracción inhalable, la relación entre la concentración másica de las partículas que ingresan en el tracto respiratorio, con respecto a la correspondiente concentración másica en el aire, debe considerarse antes de que las partículas se perturben por la presencia del individuo con exposición y la inhalación.
- Que, para el caso de los otros convenios, a la relación entre la concentración másica de las partículas que alcanzan la región considerada del tracto respiratorio, con respecto a la concentración másica de las partículas que entran en el mismo. (estos convenios pueden ser expresados como relaciones con respecto a la concentración másica del aerosol total).
- Es importante dejar claro que los convenios son aproximaciones al comportamiento del tracto respiratorio. Luego, y en este sentido, el desarrollo y funcionamiento de los muestreadores debe considerar una serie de variables, por lo demás, muy complejas, que gobiernan la entrada y penetración de partículas en el tracto respiratorio. La norma UNE EN 481, plantea las siguientes hipótesis:
- La fracción inhalable depende del movimiento del aire (velocidad, dirección), de la cadencia respiratoria y de si la respiración es a través de la nariz o de la boca. Los valores dados en el convenio para la fracción inhalable, corresponden a valores representativos de la cadencia respiratoria, y están pro-

mediados para todas las direcciones del viento. Esto es adecuado, para un individuo con exposición uniforme a todas las direcciones del viento, o predominantemente al viento lateral o desde atrás. Este convenio generalmente subestima la fracción que se inhala de las partículas más grandes, en el caso de un individuo que normalmente estuviera situado de cara al viento, especialmente para velocidades del aire superiores a 4 m/s.

- Las fracciones respirable y torácica varían de individuo a individuo y con el modelo respiratorio, y que necesariamente los convenios son aproximaciones para el caso promedio.
- Cada convenio es una aproximación a la fracción que llega a una determinada región del tracto respiratorio, no a la fracción que allí se deposita. En general, las partículas deben depositarse para producir un efecto biológico. Respecto a esto, los convenios dan lugar a una sobrestimación del efecto biológico potencial. El ejemplo más importante es el del convenio para la fracción respirable que sobrestima la fracción de partículas muy pequeñas que se depositan en las vías respiratorias no ciliadas, ya que una parte de las partículas muy pequeñas no contribuyen mucho a la masa muestreada.
- El convenio para la fracción torácica es una aproximación a esta fracción durante la respiración bucal, que es mayor que dicha fracción durante la respiración nasal. El convenio para la fracción extratorácica puede, por lo tanto, subestimar el “caso más desfavorable”, que ocurre durante la respiración nasal.

5.1. Aerosol Total

El concepto de Aerosol Total en el contexto de los convenios se define como “Todas las partículas en suspensión que se encuentran en un volumen dado de aire”. Es importante señalar que esta definición no se basa en el funcionamiento de un muestreador, así como tampoco en el comportamiento o penetración de las partículas en el organismo. Sin embargo, muchos países en el pasado, recomendaban el muestreo en base al concepto de aerosol total, polvo total o partículas totales, asumiendo que estos términos correspondían a las partículas captadas por un determinado muestreador. De hecho, instituciones internacionales consideraban que estos dispositivos de muestreo podían recoger o captar todas las partículas del aerosol, independientemente del tamaño. Posteriores estudios demostraron lo contrario y la propia Norma UNE EN 481 incluyó una nota aclaratoria indicando que: “Debido a que todos los instrumentos de medición actúan de algún modo como selectores de partículas según su tamaño, a veces es imposible medir la concentración total del aerosol”.

5.2. Convenio para la Fracción Inhalable

El convenio para el muestreo de la fracción inhalable se aproxima, para cada diámetro aerodinámico de partícula, a la relación entre la concentración de la masa de las partículas que ingresan en el tracto respiratorio con respecto a la concentración de la masa de las partículas presentes en el aire (aerosol total), antes que estas se alteren por la presencia del individuo con exposición y la inhalación.

El muestreo de la fracción inhalable debe estar de acuerdo con el siguiente criterio: para cada diámetro aerodinámico (D) en micrómetros, el porcentaje de aerosol que tiene que ser recogido (Ei) deberá estar dado por la ecuación 1.

Ecuación 1:

$$EI = 50(1 + EXP[-0.06 D])$$

Dónde:

EI= Porcentaje de aerosol que tiene que ser recogido por el instrumento de muestreo

D= Diámetro de la partícula en micrones.

NOTA: La fracción inhalable se obtuvo por medio de diferentes trabajos experimentales en los cuales se utilizó un maniquí ubicado en el interior de un túnel de viento. La aspiración del material particulado se realizaba por el orificio de la boca del maniquí. Los estudios se realizaron con partículas de diámetros aerodinámicos de hasta 100 µm.

5.3. Convenio para la Fracción Torácica

La fracción torácica se define como la fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe. El convenio para la toma de muestra de esta fracción se aproxima, para cada diámetro aerodinámico de partícula, a la relación entre la concentración en masa de las partículas que penetran más allá de la laringe con respecto a la concentración en masa de las partículas inhaladas.

El muestreo de la fracción torácica deberá estar de acuerdo con el siguiente criterio: para cada diámetro aerodinámico (D) en micrómetros, el porcentaje de las partículas del convenio para la fracción inhalable que tienen que ser recogidas (ET), deberá corresponder al de una distribución logarítmico normal acumulativa, con una mediana de 11,64 µm y una desviación típica geométrica es 1,5 µm.

El convenio torácico se puede expresar respecto del aerosol total. Los valores del convenio torácico respecto del aerosol total, para cada diámetro aerodinámico, se obtienen al multiplicar los valores de ET por 0,01 EI (obtenido de la ecuación 1). Entonces, el convenio de la fracción torácica se obtiene a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 2:

$$CT = ET \times 0,01 \times EI$$

Dónde:

CT: Convenio torácico como porcentaje del aerosol total.

ET: Convenio torácico calculado a partir del convenio para la fracción inhalable.

EI: Convenio fracción inhalable calculado como porcentaje del aerosol total.

5.4. Convenio para la Fracción Respirable

La fracción respirable se define como la fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran en las vías respiratorias no ciliadas.

El convenio para la toma de muestra de la fracción respirable se aproxima, para cada diámetro aerodinámico de partícula, a la relación entre la concentración en masa de las partículas que alcanzan las vías respiratorias no ciliadas con respecto a la concentración en masa de las partículas inhaladas.

El muestreo de la fracción respirable deberá estar de acuerdo con el siguiente criterio: para cada diámetro aerodinámico (D) en micrómetros, el porcentaje de las partículas correspondientes al convenio para la fracción inhalable, que tienen que ser recogidas (ER) deberá corresponder al de una distribución logarítmica normal acumulativa, con una mediana 4,25 µm y una desviación típica geométrica de 1,5 µm. Al igual que para la fracción torácica, a partir de una aproximación numérica de la función de distribución, se obtiene, para cada diámetro aerodinámico, los valores del convenio respirable expresados en porcentaje.

El convenio para la fracción respirable se puede expresar respecto del aerosol total. Los valores de este convenio respecto del aerosol total, para cada diámetro aerodinámico, se obtienen al multiplicar los valores de ER por 0,01 EI (obtenido de la ecuación 1). Entonces, el convenio de la fracción respirable se obtiene a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 3:

$$\mathbf{CR = ER \times 0,01 \times EI}$$

Dónde:

CR: Convenio respirable como porcentaje del aerosol total.

ER: Convenio respirable calculado a partir del convenio para la fracción inhalable.

EI: Convenio fracción inhalable calculado como porcentaje del aerosol total.

En la tabla 1 se presentan los valores numéricos de los convenios, como porcentaje del convenio (punto de corte) para la fracción inhalable y para el aerosol total.

Tabla 1

| Como porcentaje del inhalable | | | | Como porcentaje del total | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Diámetro aerodinámico D µm | Convenio inhalable EI % | Convenio torácico ET % | Convenio respirable ER % | Convenio inhalable EI % | Convenio torácico ET x EI % | Convenio respirable ER x EI % | Diámetro aerodinámico D µm |
| 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 97,1 | 97,1 | 97,1 | 1 |
| 2 | 100 | 100 | 96,8 | 94,3 | 94,3 | 91,4 | 2 |
| 3 | 100 | 100 | 80,5 | 91,7 | 91,7 | 73,9 | 3 |
| 4 | 100 | 99,6 | 55,9 | 89,3 | 89,0 | 50,0 | 4 |
| 5 | 100 | 98,1 | 34,4 | 87,0 | 85,4 | 30,0 | 5 |
| 6 | 100 | 94,9 | 19,8 | 84,9 | 80,5 | 16,8 | 6 |
| 7 | 100 | 89,5 | 10,9 | 82,9 | 74,2 | 9,0 | 7 |
| 8 | 100 | 82,2 | 5,9 | 80,9 | 66,6 | 4,8 | 8 |
| 9 | 100 | 73,7 | 3,2 | 79,1 | 58,3 | 2,5 | 9 |
| 10 | 100 | 64,6 | 1,7 | 77,4 | 50,0 | 1,3 | 10 |
| 11 | 100 | 55,5 | 0,9 | 75,8 | 42,1 | 0,7 | 11 |
| 12 | 100 | 47,0 | 0,5 | 74,3 | 34,9 | 0,4 | 12 |
| 13 | 100 | 39,3 | 0,3 | 72,9 | 28,6 | 0,2 | 13 |
| 14 | 100 | 32,4 | 0,2 | 71,6 | 23,2 | 0,2 | 14 |
| 15 | 100 | 26,6 | 0,1 | 70,3 | 18,7 | 0,1 | 15 |
| 16 | 100 | 21,6 | 0,1 | 69,1 | 15,0 | 0 | 16 |
| 18 | 100 | 14,1 | 0 | 67,0 | 9,5 | | 18 |
| 20 | 100 | 9,1 | | 65,1 | 5,9 | | 20 |
| 25 | 100 | 3,0 | | 61,2 | 1,8 | | 25 |
| 30 | 100 | 1,0 | | 58,3 | 0,6 | | 30 |
| 35 | 100 | 0,3 | | 56,1 | 0,2 | | 35 |
| 40 | 100 | 0,1 | | 54,5 | 0,1 | | 40 |
| 50 | 100 | 0 | | 52,5 | 0 | | 50 |
| 60 | 100 | | | 51,4 | | | 60 |
| 80 | 100 | | | 50,4 | | | 80 |
| 100 | 100 | | | 50,1 | | | 100 |

Fuente: Norma UNE EN – 481: 1993

6. INSTRUMENTOS PARA LA TOMA DE MUESTRA DE AEROSLES

El tren de muestreo utilizado para la toma de muestra de aerosoles, se compone generalmente: de un muestreador que selecciona la fracción de interés según el tamaño de partículas del aerosol (p.e., un ciclón), un elemento retenedor o cabezal de muestreo que recoge las partículas seleccionadas por el muestreador (p.e., un filtro), mangueras de conexión y una bomba de muestreo portátil.

El muestreador es el instrumento que permite separar y captar las partículas de interés presentes en el aerosol según su tamaño (inhalable, torácica y respirable), con una determinada eficiencia o punto de corte, establecida en los respectivos convenios para el muestreo de material particulado.

6.1. Ensayo de los Muestreadores

En general la evaluación de los muestreadores se puede realizar por medio de diferentes métodos de ensayo. El ensayo más completo y crítico se realiza utilizando un túnel de viento, en el cual se ubican los muestreadores y se exponen a cierta cantidad de diferentes tamaños de aerosoles en condiciones controladas. La eficacia y capacidad de captación del muestreador en función del diámetro aerodinámico de las partículas de la fracción de interés se comparan con los parámetros establecidos para el convenio de muestreo correspondiente (inhalable, torácica y respirable).

La norma UNE EN 13205-4¹, establece el diámetro aerodinámico de las partículas que se deben utilizar en los ensayos. La norma señala que para la fracción inhalable los tamaños deben fluctuar entre 1 µm -100 µm; para la fracción torácica entre 0,5 µm – 40 µm y para la fracción respirable entre 0,5 µm y 15 µm.

6.2. Exactitud de los Muestreadores

La exactitud del muestreador, es un parámetro que depende de diversos factores, principalmente, de los relacionados con la eficacia de muestreo y la variabilidad intrínseca de los diferentes muestreadores, que sin duda puede variar de un fabricante a otro. La eficacia de muestreo está definida para cada tipo de fracción y corresponde a la relación entre la concentración del aerosol recogido por el muestreador y la concentración ambiental del aerosol. Es importante señalar, que en general la eficacia de muestreo de los muestreadores utilizados en condiciones reales, presenta diferencias respecto de la masa captada por los muestreadores ensayados en condiciones ideales o de laboratorio. Esto se produce dado que el comportamiento de los muestreadores en condiciones reales se ve influenciado por múltiples factores, entre los cuales los más críticos son la proyección de partículas de elevado tamaño, la velocidad y dirección del viento, así como también irregularidades en la distribución del tamaño de partículas.

6.3. Tipos de Muestreadores

En el mercado existe una gran diversidad de muestreadores de material particulado diseñados y fabricados principalmente por Estados Unidos y varios países de Europa. En la Tabla 2, se presentan diferentes tipos de muestreadores, para las distintas fracciones del aerosol establecidos en los convenios de muestreo, señalando algunas características importantes como son:

- El modelo del muestreador
- El caudal de muestreo,
- El elemento de retención,
- El fabricante, y
- La página web, actualizada y vigente para obtener información técnica del instrumento

1 Norma UNE-EN 13205-4: 2015 Exposición en el lugar de trabajo. Evaluación del funcionamiento de los muestreadores para la medición de concentraciones de partículas en suspensión en el aire. Parte 4: Ensayo de funcionamiento en laboratorio fundamentado en la comparación de concentraciones

Tabla 2

| Fracción del aerosol | Muestreador Personal | Caudal de muestreo l/min | Elementos de retención | Fabricante | Página Web |
|----------------------|-------------------------------------|--------------------------|---|----------------------------|--------------------------|
| Inhalable | IOM | 2 | Filtro de 25 mm en portafiltro | SKC (Reino Unido) | www.skcltd.com |
| | PGP-GSP 3.5 | 3,5 | Filtro de 37 mm | GSA (Alemania) | www.gsa-messgeraete.de |
| | PGP-GSP 10 | 10 | Filtro de 37 mm | GSA (Alemania) | www.gsa-messgeraete.de |
| | BUTTON | 4 | Filtro de 25 mm | SKC (Reino Unido) | www.skcltd.com |
| | CIP-10 | 10 | Espuma | Tecora (Francia) | www.tecora.com |
| Torácica | GK 2,69 | 1.6 | Filtro de 37 mm | BGI (Estados Unidos) | www.bgi.mesalabs.com |
| | PEM-2-10 Verde | 2 | Filtro de 37 mm | TSI (Estados Unidos) | www.tsi.com |
| | PEM-4-10 Oro | 4 | Filtro de 37 mm | TSI (Estados Unidos) | www.tsi.com |
| | PEM-10-10 | 10 | Filtro de 37 mm | TSI (Estados Unidos) | www.tsi.com |
| Respirable | IOM multidust | 2 | Filtro de 25 mm en portafiltro | SKC (Reino Unido) | www.skcltd.com |
| | Ciclón de nylon conductivo de 10 mm | 1,7 | Filtro de 37 mm | Zefon (Estados Unidos) | www.zefon.com |
| | GK 2,69 | 4,2 | Filtro de 37 mm | BGI (Estados Unidos) | www.bgi.mesalabs.com |
| | Ciclón de plástico Higgins-Dewell) | 2,2 | Filtro de 25mm | Casella (Reino Unido) | www.casellasolutions.com |
| | BGI 4 | 2,2 | Filtro de 37 mm | BGI (Estados Unidos) | www.bgi.mesalabs.com |
| | Ciclón aluminio | 2,5 | Filtro de 25 o 37 mm | SKC (Reino Unido) | www.skcltd.com |
| | ciclón GS-1 | 2 | Filtros de 25 o 37 mm de diámetro casetes de 3 piezas | SKC (Reino Unido) | www.skcltd.com |
| | PGP-FSP 2 | 2 | Filtro de 37 mm | GSA (Alemania) | www.gsa-messgeraete.de |
| | PGP-FSP 10 | 10 | Filtro de 37 mm | GSA (Alemania) | www.gsa-messgeraete.de |
| | Ciclón Nylon 10 mm Dorr-Oliver | 1,7 | Filtro de 37 mm | Sensidyne (Estados Unidos) | www.sensidyne.com |

6.4. Estrategia para la Toma de Muestra con Muestreadores

Como se observa en la Tabla 2, existen diversos tipos de muestreadores según la fracción de un aerosol a muestrear, los cuales están diseñados para capturarlos a diferentes caudales. Este es un factor de la mayor importancia en una estrategia de muestreo, considerando que todas las técnicas analíticas establecen, como requisito para analizar una muestra, que esta cumpla con el volumen mínimo de muestreo, el cual está asociado a una masa mínima de captura.

Cuando se va evaluar un lugar de trabajo, y se conoce o se tiene una alta probabilidad que el filtro de la muestra se colmate, lo que implicaría que ésta sería rechazada por el laboratorio que la analizaría, se hace necesario tomar más de una muestra durante la jornada de trabajo, teniendo presente que cada una de ellas debe cumplir con el volumen mínimo de muestreo.

Por otra parte, también se debe considerar el tipo de límite permisible que tiene el aerosol de interés, ya que este nos define el tiempo mínimo de muestreo, que, para el caso, por ejemplo, del cuarzo, es del 70% de la jornada diaria, por tener límite permisible ponderado. O sea, debemos conjugar el tiempo y el volumen mínimo de muestreo, para que la evaluación de un trabajador en un lugar de trabajo sea representativa y confiable.

Ejemplo

Se evaluará la exposición de un trabajador a cuarzo que se desempeña en una Planta de Chancado Secundario, donde la jornada de trabajo es de 12 horas. Considerando el tipo de límite se deberá muestrear, como mínimo, el 70% de la jornada o sea 8,4 horas (504 minutos). Las muestras se analizarán por la técnica analítica Espectrofotometría Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR), donde el volumen de muestreo es de entre 400 litros y 800 litros.

a) Estrategia 1

- Se dispone de 2 ciclones Dörr Oliver de $QM = 1,7$ l/min
- VM Mínimo = 400 litros
- tM Mínimo = 8,4 horas (504 minutos)
- Estrategia de muestreo: Se tomarán 3 muestras de 4 horas cada una (240 minutos), o sea, se cubrirá el total de la jornada de 12 horas. Cada muestra tendrá un VM= 408 litros, cumpliendo con el volumen mínimo de muestreo.

b) Estrategia 2

- Se dispone de 1 ciclones Dörr Oliver de $QM = 1,7$ l/min y de 2 ciclones de aluminio de $QM = 2,5$ l/min
- tM Mínimo = 8,4 horas (504 minutos)
- Estrategia de muestreo: Se tomará 1 muestra de 4 horas (240 minutos) con el ciclón de 1,7 l/min, obteniéndose un VM= 408 litros, y 2 muestras de 2,7 horas cada una (162 minutos), donde cada una comprenderá un VM = 405 litros. Todas las muestras cumplen con el volumen mínimo de muestreo. En total se cubrió el 78,3 % de la jornada (9,4 horas).

Comentario

- En la Estrategia 1 considerando que se dispone de un solo tipo de ciclón la única opción para que cada muestra cumpla con el volumen mínimo de muestreo, es que cada una de las 3 muestras tenga un tiempo de muestreo de 4 horas, lo que en definitiva implica evaluar el turno completa.
- En la Estrategia 2, por el hecho de disponer de 2 tipos de ciclones, de 1,7 l/min y 2,5 l/min, es factible planificar un muestreo más corto pero representativo, ya que a través de 3 muestras se cubrió el 78,3% de la jornada.
- Disponer de más de un tipo de ciclón nos permite planificar una mejor estrategia y tener una mayor variedad de opciones para cumplir con los tiempos y volúmenes mínimos de muestreo.

7.- BIBLIOGRAFÍA.

1. Nota Técnica de Prevención. NTP: 800: Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (V): Recomendaciones para la toma de muestra de los aerosoles. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España 2008.
2. Norma Europea EN: 481: 1993. Atmosferas en los puestos de trabajo: Definición de las fracciones por el tamaño de las partículas para la medición de aerosoles.
3. Norma Europea EN: 13205-4: 2015. Exposición en el lugar de trabajo. Evaluación del funcionamiento de los muestreadores para la medición de concentraciones de partículas en suspensión en el aire. Parte 4: Ensayo de funcionamiento en laboratorio fundamentado en la comparación de concentraciones.
4. Norma Europea EN: 13205-6: 2015. Exposición en el lugar de trabajo. Evaluación del funcionamiento de los muestreadores para la medición de concentraciones de partículas en suspensión en el aire. Parte 6: Ensayos de transporte y de manipulación.
5. Pérez, Ramírez, D. & Ramírez, J. Diseño óptimo de colectores ciclónicos. Revista Ainsa. Número 26. año 1994 Colombia.
6. Nota Técnica de Prevención. NTP 731: Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (I): Aspectos generales. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España 2004.
7. Nota Técnica de Prevención. NTP 764: Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (II): Muestreadores personales de las fracciones del aerosol. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España 2007.
8. Muestra Nota Técnica de Prevención. NTP 765: Evaluación de la exposición laboral a aerosoles (III): Muestreadores de la fracción torácica, respirable y multifracción. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España 2007.
9. CR-03 Toma de muestras de aerosoles: Muestreadores de la fracción inhalable de materia particulada. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España 2006.