

Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM₁₀) en el Valle de Aburrá, Colombia

Julio César Saldarriaga Molina*, Carlos Alberto Echeverri Londoño** y Francisco José Molina Pérez***

(Recibido el 12 de noviembre de 2002. Aceptado el 30 de septiembre de 2004)

Resumen

En el Valle de Aburrá, región noroccidental de Colombia, habitado por tres millones de personas, recorrido por 400.000 vehículos aproximadamente y con la presencia de un sector industrial textil, de alimentos y metal-mecánico importante, se evaluaron las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM₁₀), durante el período de diciembre de 2000 a junio de 2001.

Las determinaciones de PST y PM₁₀ se realizaron en diez estaciones, distribuidas de norte a sur, cubriendo zonas urbanas y rurales de los municipios de Girardota, Bello, Medellín, Itagüi, Sabaneta y Caldas. Al analizar la relación PM₁₀/PST, se encontró que las mejores correlaciones estadísticas se localizan en las zonas centro y sur del valle de Aburrá. Además se observó la tendencia creciente en la relación PM₁₀/PST, desde 0,527 en la estación rural Girardota (Norte), hasta 0,813 en la estación urbana Caldas (Sur).

Dicho gradiente en la relación PM₁₀/PST parece estar relacionado con el régimen de vientos que predomina en el Valle de Aburrá con dirección norte-sur, el cual hace que las partículas más pequeñas migren de norte a sur, incrementando la relación PM₁₀/PST en la misma dirección.

----- *Palabras clave:* contaminación del aire, material particulado, partículas suspendidas totales, partículas respirables, Valle de Aburrá.

Total suspended particles (TSP) and breathable particles (PM₁₀) in Aburra Valley, Colombia

Abstract

In the Aburra's valley, nor-western region of Colombia, inhabited by 3 million people, crossed by 400,000 vehicles; with the presence of establishments of

* Ingeniero Sanitario. M.Sc. en Ingeniería Ambiental. Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. jcsalda@udea.edu.co.

** Ingeniero Químico. M.Sc. en Ingeniería Ambiental. Profesor de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Medellín, Colombia. cecheverri@udem.edu.co.

*** Ingeniero Sanitario. M.Sc. en Ingeniería Sanitaria. Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. fmolina@udea.edu.co.

industrial sectors: textile, foods and metal-mechanical; The concentrations of total suspended particles (PST) and breathable particles (PM_{10}), were evaluated, during the period: December of 2000 to June of 2001.

The determinations of PST and PM_{10} , were performed in ten stations, distributed of north to the south, covering urban and rural zones with the municipalities of: Girardota, Bello, Medellín, Itagüí, Sabaneta and Caldas. When analyzing relation PM_{10}/PST , was that the best statistical correlations are located in the zones center and the south of the valley. In addition the increasing tendency in relation PM_{10}/PST was observed, from 0.527 for the rural station Girardota (North), to 0.813 in the urban station Caldas (South). This gradient in relation PM_{10}/PST apparently this related to the wind regime that predominates in the Valley of Aburrá with direction the north-south, which causes that the fine particles migrate of north to the south, increasing relation PM_{10}/PST in the same direction.

----- *Key words:* air pollution, particulate matter, total suspended particles, breathable particles, Valle de Aburrá.

Introducción

Las partículas suspendidas en la atmósfera, de acuerdo con su comportamiento aerodinámico, se clasifican en partículas sedimentables y partículas suspendidas. Las partículas suspendidas a su vez se dividen en partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM₁₀), identificadas como las partículas menores de diez micrómetros [1]. Actualmente se investiga el comportamiento y los riesgos para la salud humana de las partículas respirables finas (PM_{2,5}), las cuales tienen diámetros menores a 2,5 µm [2].

Las partículas grandes son a menudo de origen natural, producidas por procesos mecánicos tales como la erosión del suelo. Por otro lado las partículas más pequeñas son principalmente de origen antropogénico, emitidas principalmente por procesos de combustión, formándose por condensación y coagulación [3].

La presencia de partículas en la atmósfera, solas o combinadas con otros contaminantes genera riesgos para la salud, pues afecta el sistema respiratorio humano [4] aún en concentraciones bajas de partículas respirables (20 µg/m³). También puede incrementar los riesgos de infecciones respiratorias agudas (IRA) y episodios asmáticos [5].

Para 1999 en la ciudad de Medellín las infecciones respiratorias agudas se presentaron como la primera causa de consulta externa para el total de la población, con el 9,4% de participación, siendo más grave la situación para la población menor de cinco años, con el 20% [6].

Diferentes estudios recientes evalúan las relaciones PST, PM₁₀ y PM_{2,5}. Estas relaciones permiten valorar la composición de las partículas por tamaño y su presencia en la atmósfera. Algunos de estos estudios se citan a continuación:

Brook, J. *et al.* (1996) [7], estudiaron en 19 sitios de Canadá las relaciones entre partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM₁₀ y PM_{2,5}), entre los años 1986 y 1994, encontrando que las concentraciones para PST oscilaban entre

10 y 575 µg/m³ y para PM₁₀ entre 5 y 175 µg/m³ pero la mayoría de las concentraciones estaban por debajo de 50 µg/m³ y entre 2 y 30 µg/m³ para PM_{2,5}. La relación PM₁₀/PST presentó un promedio de 0,44 y para la relación PM_{2,5}/PM₁₀ un promedio de 0,49.

Walsh, K. *et al.* (2002) [8], realizaron una estimación de concentraciones ambientales de PM_{2,5} para el estado de Maryland (USA), utilizando relaciones PM_{2,5}/PM₁₀ que oscilan de 0,50 a 0,94, previamente determinadas, de esta manera realizan mediciones de PM₁₀ y estiman las concentraciones de PM_{2,5}.

Jinsart, W. *et al.* (2002) [9], al estudiar la contaminación por partículas en los bordes de carretera en Bangkok, establecieron relaciones PM_{2,5}/PM₁₀ entre 0,62 y 0,74, plantearon que para mejor evaluación de los efectos en la salud de las partículas, se considera que la medición de PM₁₀ debe complementarse con la medición simultánea de PM_{2,5}.

Vukovich, F. y Sherwel, J. (2002) [10], realizaron la comparación de las variaciones de masa de partículas entre un sitio urbano en Washington D. C. y un sitio en el campo en el parque nacional Shenandoah, V. A., realizando la evaluación a partir de datos de siete años. En dicha evaluación utilizan la relación PM_{2,5}/PM₁₀, que toma valores de 0,73 para el sitio urbano y de 0,71 para el sitio campestre.

Motallebi, N. *et al.* (2003) [11], realizaron la comparación de datos de PM_{2,5} y PM₁₀, para California (USA) en series históricas de datos de 1988 al año 2000, estudiando además la relación PM_{2,5}/PM₁₀ y su variación mensual para ocho localidades, presentando valores para esta relación de 0,2 a 0,8; específicamente para Los Ángeles la relación PM_{2,5}/PM₁₀ toma valores de 0,45 a 0,60.

Partiendo del interés por aumentar el conocimiento de la concentración, distribución y composición de las partículas suspendidas en el Valle de Aburrá, el Área Metropolitana financió el estudio denominado "Evaluación de las partículas

suspendidas en el Valle de Aburrá”, realizado conjuntamente por la Universidad de Antioquia y la Universidad de Medellín [12]. El presente artículo consigna los resultados del estudio mencionado en lo que respecta a la evaluación de la concentración total de partículas suspendidas, fracción respirable y análisis de las correlaciones entre partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM₁₀) para los diez sitios estudiados.

Metodología

Equipos

Para la medición de las concentraciones de material particulado en suspensión se emplearon equipos medidores de partículas suspendidas totales (PST), denominados medidores de alto volumen (Hi-Vol) y equipos para la medición de partículas respirables, denominados medidores de alto volumen PM₁₀.

Los equipos Hi-Vol permiten coleccionar partículas hasta de 100 micrones, dentro de las cuales se encuentran partículas respirables y no respirables; las respirables son aquellas que logran pasar el

tracto respiratorio penetrando en los alvéolos pulmonares. De igual forma los medidores PM₁₀, permiten coleccionar exclusivamente todo el material respirable, establecido con tamaño de partícula menor que diez micrones.

Durante el período de estudio de la calidad del aire en el Valle de Aburrá se realizaron mediciones de partículas suspendidas totales (PST) y respirables (PM₁₀) en diez estaciones de muestreo; dichos muestreos se realizaron de forma periódica escalonada, con el fin de cubrir todos los sitios de muestreo con los equipos disponibles [12].

Método de medición partículas suspendidas totales (PST)

La figura 1 esquematiza el muestreador de alto volumen Hi-Vol. El método de referencia permite medir la concentración de partículas suspendidas totales en el aire por medio de un muestreador de alto volumen (Hi-Vol) adecuadamente instalado, que succiona a través de un filtro de fibra de vidrio una cantidad determinada de aire (aproximadamente 1,2 a 1,7 m³/min) al interior de una caseta o coraza de protección [13, 14].

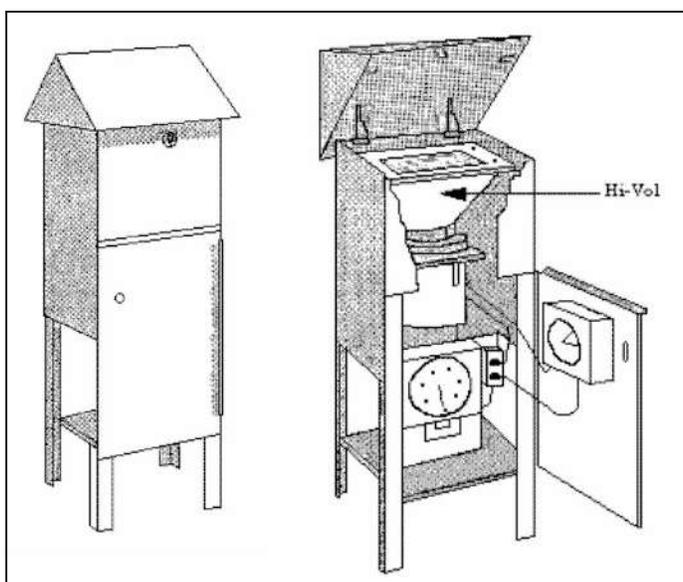


Figura 1 Muestreador de alto volumen (Hi-Vol)

En este método, el filtro se pesa en el laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de su utilización, para determinar la ganancia de peso neto (masa). El volumen total de aire muestreado, corregido a condiciones de referencia (101,325 KPa y 25 °C), se determina a partir del flujo de aire ambiente medido y del tiempo de muestreo. La concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de partículas colectadas en el filtro y el volumen de aire muestreado durante 24 ± 1 horas y se expresa en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [15, 16, 17].

Método de medición partículas en suspensión menores de 10 μm (PM₁₀)

El muestreo de partículas en suspensión menores de 10 μm , se realiza mediante un equipo Hi-Vol dotado adicionalmente de un sistema de separación inercial, tal como se muestra en la figura 2.

El método permite medir la concentración de partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm nominales (PM₁₀) en aire ambiente, durante un período de muestreo de 24 ± 1 horas.

El proceso de medición es no destructivo, y la muestra puede someterse a análisis físicos y químicos posteriores.

Los filtros utilizados para captar las PM₁₀ son de cuarzo con una porosidad de 0,3 μm . Cada filtro es pesado (después de equilibrar la humedad) antes y después de usar para determinar la ganancia de peso (masa) neto debido a las partículas colectadas. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia (25 °C y 101,325 KPa), es determinado a partir del flujo medido y el tiempo de muestreo. La concentración de PM₁₀ en el aire ambiente es calculada como la masa total de partículas colectadas dividida por el volumen de aire muestreado, y se expresa en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [15, 16, 17].

Selección de sitios de muestreo

La selección de sitios de muestreo se realizó teniendo en cuenta criterios como densidad demográfica, usos del suelo, dirección del viento, tipos y características de las fuentes más importantes del sector, y los objetivos del estudio. Las mediciones de partículas totales y respirables se realizaron en diez sitios del Valle de Aburrá, el cual

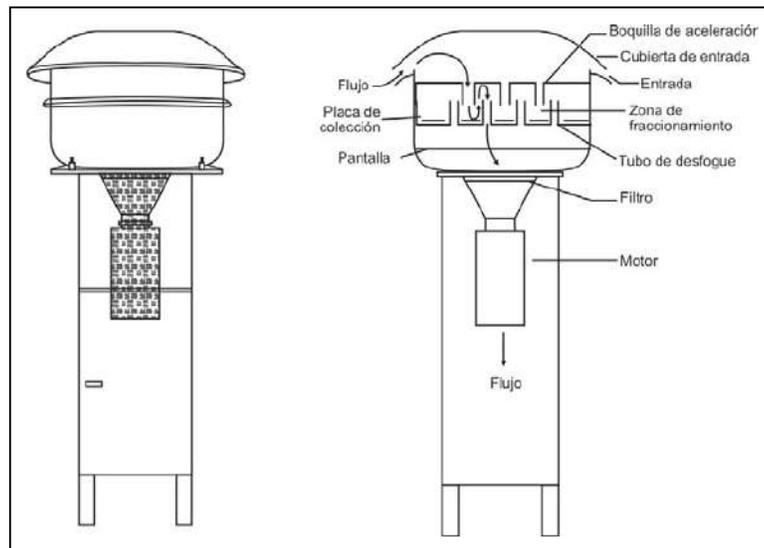


Figura 2 Muestreador PM₁₀

se dividió en tres zonas, así: zona norte (Barbosa y Girardota), zona centro (Medellín, Copacabana, Bello, Sabaneta e Itagüí) y la zona sur (Caldas y La Estrella), en cada zona se localizaron estaciones en áreas rurales y áreas urbanas.

El período de muestreo para la medición de las partículas (PST y PM_{10}) estuvo comprendido entre el 17 de diciembre de 2000 y el 6 de junio de 2001. Durante dicho período se colectó un total de 91 muestras de partículas suspendidas totales y de partículas menores de diez micrómetros, para un total de 182 muestras.

Determinación de las concentraciones

Para obtener las concentraciones de PST y PM_{10} en cada uno de los sitios de interés, se requiere el peso inicial y final de los filtros y el volumen total de aire muestreado. Este último parámetro se calcula como el producto entre el caudal a condiciones de referencia para cada día de medición y el tiempo efectivo de muestreo. A continuación se presenta la ecuación empleada para calcular las concentraciones de partículas suspendidas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual es válida para las mediciones de PST y PM_{10} .

$$\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{[(W_f - W_i) - (B_f - B_i)] \times 10^{-6}}{Q \times t}$$

Donde:

- W_f = Peso final del filtro (g)
- W_i = Peso inicial del filtro (g)
- B_f = Peso final del filtro usado como blanco o control (g)
- B_i = Peso inicial del filtro usado como blanco o control (g)
- Q = Caudal de muestreo (m^3/min)
- t = Tiempo de muestreo (min)
- 10^{-6} = Factor de conversión de gramos (g) a microgramos (μg)

Resultados y análisis

En la tabla 1 se presentan las concentraciones promedio de las partículas suspendidas totales (PST) y respirables (PM_{10}), y la relación (PM_{10}/PST) para las estaciones de muestreo.

Las figuras 3 a 12 presentan la correlación entre las PST y las PM_{10} en las muestras recolectadas en las estaciones de muestreo. La tabla 2 muestra los coeficientes de correlación, el estadístico R^2 y la relación (PM_{10}/PST) promedio.

En la tabla 2 el coeficiente de correlación indica que las estaciones de muestreo, excepto Girardota rural y Bello urbana, presentan una relación fuerte entre partículas suspendidas to-

Tabla 1 Concentración promedio de partículas suspendidas totales (PST), respirables (PM_{10}) y relación PM_{10}/PST en las diferentes estaciones de muestreo

Estación	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Relación PM_{10}/PST
Girardota rural	58	33	0,527
Girardota urbana	77	58	0,733
Bello urbana	88	55	0,603
Medellín norte urbana	70	50	0,672
Medellín centro urbana	116	99	0,840
Medellín centro rural	52	39	0,737
Medellín sur rural	37	34	0,856
Itagüí urbana	72	50	0,677
Sabaneta urbana	55	40	0,717
Caldas urbana	78	66	0,813

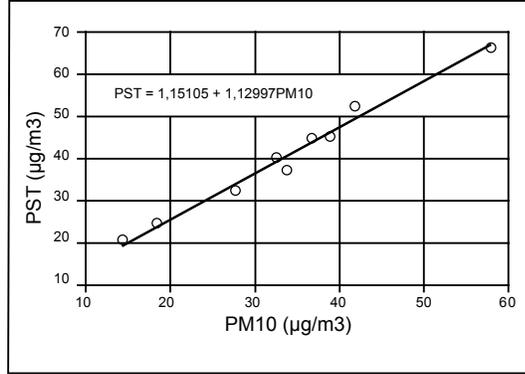


Figura 3 Correlación entre PST y PM₁₀ en Medellín sur rural

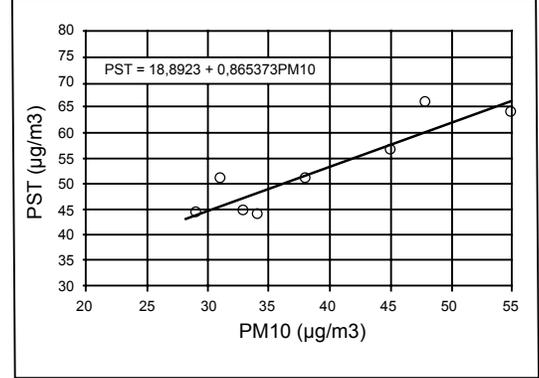


Figura 4 Correlación entre PST y PM₁₀ en Medellín centro rural

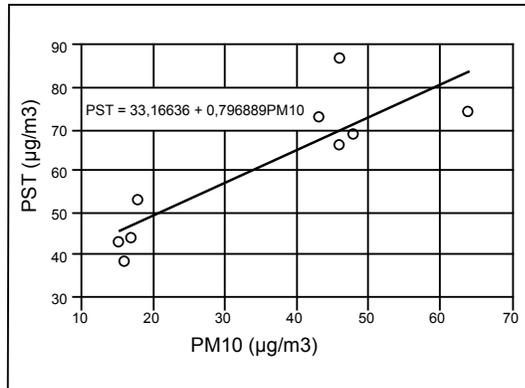


Figura 5 Correlación entre PST y PM₁₀ en Girardota rural

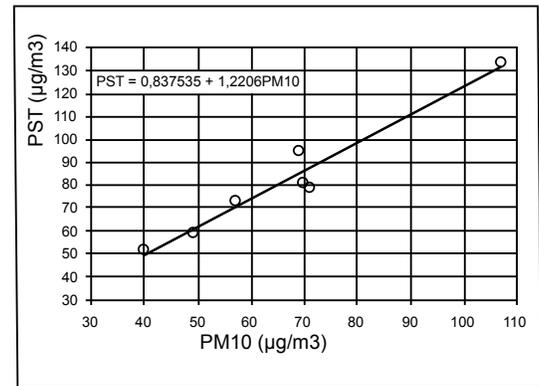


Figura 6 Correlación entre PST y PM₁₀ en Caldas urbana

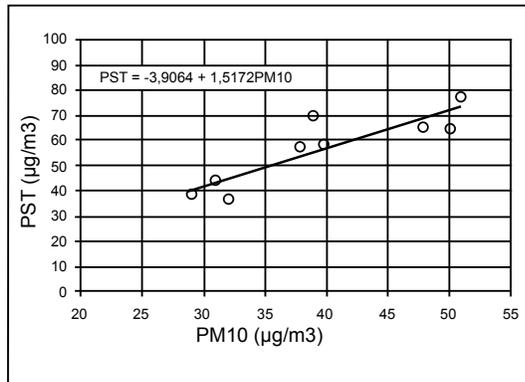


Figura 7 Correlación entre PST y PM₁₀ en Sabaneta urbana

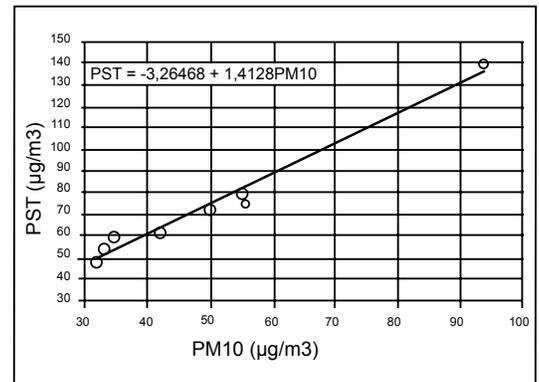


Figura 8 Correlación entre PST y PM₁₀ en Medellín norte urbana

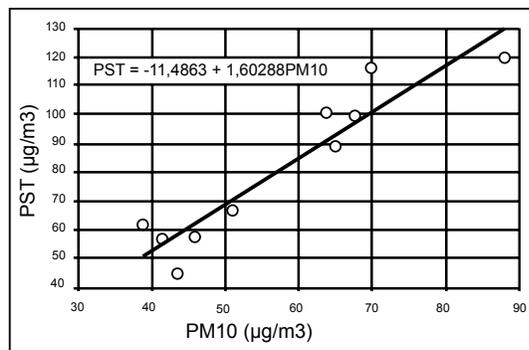


Figura 9 Correlación entre PST y PM₁₀ en Girardota urbana

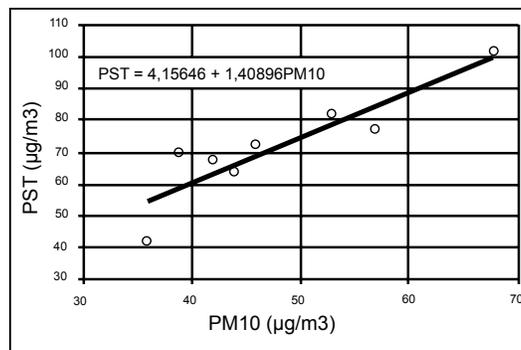


Figura 10 Correlación entre PST y PM₁₀ en Itagüí urbana

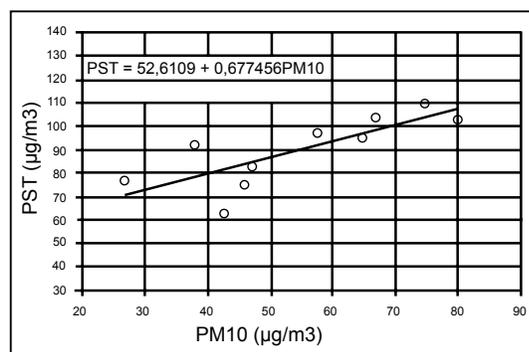


Figura 11 Correlación entre PST y PM₁₀ en Bello urbana

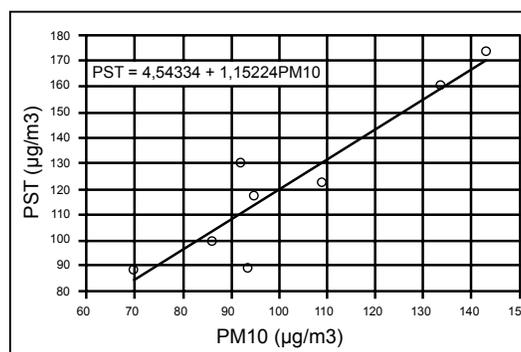


Figura 12 Correlación entre PST y PM₁₀ en Medellín centro urbana

Tabla 2 Estadísticos de correlación entre PST y PM₁₀ para las estaciones de muestreo

Estadístico	Estación				
	Medellín sur rural	Girardota rural	Medellín centro rural	Sabaneta urbana	Caldas urbana
Coefficiente de correlación	0,99097	0,876046	0,911749	0,885693	0,975258
R ²	98,2022	76,7457	83,1287	78,4452	95,1127
Relación (PM ₁₀ /PST)	0,85594	0,52711	0,73678	0,71745	0,81277

Estadístico	Estación				
	Medellín norte urbana	Girardota urbana	Itagüí urbana	Bello urbana	Medellín centro urbana
Coefficiente de correlación	0,99015	0,93871	0,90223	0,77764	0,92975
R ²	98,0392	88,1167	81,4023	60,4717	86,4428
Relación (PM ₁₀ /PST)	0,67236	0,73260	0,67689	0,60342	0,83992

tales y respirables. El estadístico R² explica el porcentaje de variabilidad de las PST en función de las PM₁₀. Las estaciones que explican mejor la variabilidad de las PST en función de las PM₁₀ son Medellín sur rural, Medellín norte urbana y Caldas urbana. La diferencia entre 100 y R² es el porcentaje de variabilidad de las partículas suspendidas totales que no es explicado por las partículas respirables.

Conclusiones

Las estaciones Medellín sur rural, Medellín centro urbana y Caldas urbana presentan el mayor valor de la relación PM₁₀/PST, es decir, la fracción respirable más alta. Estas relaciones altas se deben a la mayor influencia de las partículas finas suspendidas en el aire.

La estación Medellín sur rural, localizada en la zona sur oriental del Valle de Aburrá, presenta la mayor relación PM₁₀/PST. En esta zona no existen fuentes directas de contaminación, por lo tanto se considera esta estación como una estación típica de fondo.

La estación Medellín centro urbana es una de las estaciones con mayor relación PM₁₀/PST, esta relación alta se debe a la influencia directa de las emisiones de partículas suspendidas provenientes del parque automotor.

Si se ordenan las estaciones de muestreo según su ubicación (Norte a Sur), se observa la tendencia creciente en la relación PM₁₀/PST, la que va desde 0,527 para la estación Girardota rural (Norte), hasta 0,813 en Caldas urbana (Sur). Dicho gradiente en la relación PM₁₀/PST se explica por el régimen de vientos que predomina en el Valle de Aburrá con dirección norte-sur, el cual hace que las partículas viajen en dicha dirección, especialmente las partículas más pequeñas, incrementando la relación PM₁₀/PST. Para hacer este análisis se excluye la estación Medellín centro urbana porque se ve afectada directamente por las emisiones de partículas finas generadas por el tráfico vehicular del centro de Medellín.

Las mejores correlaciones entre PM₁₀ y PST se presentan en las estaciones Medellín sur rural (0,990970), Medellín norte urbana (0,990150) y Caldas urbana (0,975258). En estas estaciones se podría monitorear un solo contaminante, PST o PM₁₀ y estimar el otro (véanse figuras 3, 8 y 6, respectivamente), en este caso desde el punto de vista económico sería mejor medir PST y estimar PM₁₀.

Agradecimientos

Para el Área Metropolitana Valle de Aburrá por la financiación y apoyo al proyecto "Evaluación del material particulado en suspensión en el Valle de Aburrá".

Referencias

1. Bedoya, Julián. "Comparación entre medidores Hi-Vol y PM₁₀". En: *Curso Contaminación del Aire por Material Particulado*. AINSA, Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia. Medellín. Octubre, 1993. pp. 108-110.
2. <http://www.epa.gov/airs/criteria.html>.
3. Mesquita, Armando *et al.* *Engenharia de ventilação industrial*. Cetesb/Ascetesb. São Paulo, Brasil. 1985. pp. 91-95.
4. Nieto, Óscar. "Efectos en la salud de la contaminación por material particulado". En: *Curso Contaminación del Aire por Material Particulado*. AINSA. Medellín. Octubre, 1993.
5. Abbey, D. *et al.* "Chronic respiratory symptoms associated with long-term ambient concentrations of fine particulates less than 2.5 microns in aerodynamic diameter (PM_{2.5}) and other air pollutants". En: *J-Expo-Anal-Environ-Epidemiol.* Vol. 5. N.º 2. April-June, 1995. pp. 137-159.
6. Alcaldía de Medellín. Secretaría de Planeación Municipal. *Macroindicadores Medellín 1999*. Medellín, 2000.
7. Brook, Jeffrey *et al.* "The relationship among TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and inorganic constituents of atmospheric particulate matter at multiple Canadian locations". En: *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 47. N.º 1. January, 1997. pp. 2-19.
8. Walsh, Kenneth *et al.* "Estimation of ambient PM_{2.5} concentrations in Maryland and verification by measured values". En: *Journal of the Air and Waste Man-*

- agement Association. Vol. 52. N.º 10. October, 2002. pp. 1161-1175.
9. Jinsart, Wanida *et al.* "Roadside particulate air pollution in Bangkok". En: *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 52. N.º 9. September, 2002. pp. 1102-1110.
 10. Vukovich, Fred *et al.* "Comparison of fine particles and the relationship between particles variations and meteorology at an urban site and a remote site in the eastern United States". En: *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 52. N.º 5. May, 2002. pp. 573-584.
 11. Motallebi, Nezhat *et al.* "Particulate matter in California. Part 2: Spatial, temporal and compositional patterns of PM_{2,5}, PM_{10-2,5} y PM₁₀". En: *Journal of the Air and Waste Management Association*. Vol. 53. N.º 12. December, 2003. pp. 1517-1530.
 12. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Evaluación de partículas en suspensión en el Valle de Aburrá*. Universidad de Antioquia-Universidad de Medellín. Medellín. Agosto, 2001.
 13. Ministerio del Medio Ambiente de la República de Colombia. *Decreto 948 del 5 de junio de 1995*. Bogotá, 1995.
 14. Ministerio de Salud de la República de Colombia. *Decreto 02 del 11 de enero de 1982*. Bogotá, 1982.
 15. APHA Intersociety Committee. *Methods of air sampling and analysis*. Washington, D. C. American Public Health Association. 1997.
 16. Redaire. *Boletín 5 de la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire en los Valles de Aburrá y San Nicolás*. Medellín, 1996.
 17. World Meteorological Organization. *International operations handbook for measurement of background atmospheric pollution*. N.º 491. Geneva, 1978.