

Relación entre $PM_{2,5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá

Boris Galvis, Néstor Y. Rojas

Universidad de los Andes; Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

e-mail: nyrojasr@unal.edu.co

Resumen

Se realizaron mediciones simultáneas de material particulado menor a 2,5 micras ($PM_{2,5}$) y menor a 10 micras (PM_{10}), durante periodos de hasta dos meses, en cinco estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Bogotá y se analizaron los resultados con herramientas estadísticas en busca de correlaciones entre $PM_{2,5}$ y PM_{10} . Los resultados del análisis muestran una correlación positiva y lineal entre los dos parámetros.

Palabras clave: Contaminación del aire, material particulado, $PM_{2,5}$, PM_{10} .

1 Introducción

Recientemente se ha discutido en círculos académicos y al interior de las autoridades ambientales sobre la necesidad de monitorear la concentración másica de partículas suspendidas en el aire, de un tamaño inferior a 2,5 micras ($PM_{2,5}$), además de la concentración de partículas de tamaño inferior a 10 micras (PM_{10}) en la ciudad de Bogotá, dado que numerosos estudios internacionales han aportado evidencia según la cual las partículas más finas tienen una mayor asociación con los indicadores de mortalidad y morbilidad de la población, como lo sintetiza Harrison (2000). Para aportar información adecuada que permita sustentar una decisión en tal sentido, la Universidad de los Andes y El Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente de la ciudad de Bogotá – DAMA, iniciaron trabajos orientados a explorar la relación entre $PM_{2,5}$ y PM_{10} en las diferentes zonas de la ciudad.

La medición de material particulado como PM_{10} se ha llevado a cabo de manera continua en la ciudad desde la instalación de la red de monitoreo de calidad del aire del DAMA en 1997. Anteriormente, la red de monitoreo de la secretaría de salud del distrito también había monitoreado este contaminante, uno de los definidos como

contaminantes criterio a nivel mundial, durante cerca de una década (IDEAM, 2002). La medición de PM_{10} está justificada por su asociación con datos de mortalidad y morbilidad de la población. La evidencia epidemiológica indica que un aumento en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM_{10} está asociado a un aumento en alrededor del 1% en la mortalidad por todas las causas (WHO, 2000). A pesar de diversos cuestionamientos sobre las evidencias epidemiológicas (Harrison 2000, Green 2002), esta asociación continúa siendo aceptada por la mayor parte de las autoridades ambientales y de salud alrededor del mundo.

En los últimos años, se ha encontrado evidencia sobre asociaciones más fuertes entre $PM_{2,5}$ y los datos de morbilidad y mortalidad, que llevaron a algunos estados de Estados Unidos a establecer un estándar para $PM_{2,5}$, con el fin de reducir los riesgos de salud asociados al material particulado de este tamaño (US-EPA, 2003). Las partículas $PM_{2,5}$ son respirables, lo cual apoya la evidencia de una mayor asociación de estas partículas con datos de morbilidad y mortalidad. Sin embargo, estudios toxicológicos han mostrado que son las partículas con un tamaño inferior a 0,1 micras las que ocasionan respuestas tóxicas tales como irritación e inflamación alveolar, lo cual ha llevado a sugerir que la medición de $PM_{2,5}$ no sustituiría efectivamente la medición de PM_{10} (Harrison, 2000). En tal caso, podría ser más conveniente una medición de partículas de acuerdo a su concentración en número de partículas por cada m^3 de aire, aunque no se ha encontrado aún una relación epidemiológica entre el aumento en la concentración en número de partículas y los indicadores de mortalidad y morbilidad de la población (Harrison, 2000).

Dada la controversia, debería considerarse muy cuidadosamente la instalación de equipos de monitoreo de $PM_{2,5}$ en todas las estaciones de la red de monitoreo de una ciudad en un país en vías de desarrollo, pues posiblemente sea prioritario hacer inversiones en otro tipo de estudios o mediciones.

En este trabajo se utilizaron los equipos de monitoreo de material particulado de diferentes estaciones de la red de calidad del aire de Bogotá, y se adaptaron para medir $PM_{2,5}$, mediante un impactador para separación del material grueso, de diámetros entre 10 micras y 2,5 micras, en campañas cortas, para determinar relaciones útiles entre $PM_{2,5}$ y PM_{10} . Estas relaciones pueden ser usadas en estudios de salud pública y en la determinación de la efectividad de diversas medidas para mejorar la calidad del aire. Este estudio muestra cómo en algunas estaciones pueden utilizarse datos de PM_{10} para predecir concentraciones de $PM_{2,5}$ en diversas zonas de la ciudad, y cómo en otras estaciones debería realizarse una medición directa de $PM_{2,5}$.

2 Antecedentes

En la última década se han realizado numerosos estudios en países y ciudades latinoamericanas y del mundo, sobre la contribución de diferentes tipos de fuentes a la contaminación atmosférica por $PM_{2,5}$. En la mayoría de estos estudios se analiza la composición química del $PM_{2,5}$, la relación entre el $PM_{2,5}$ y el PM_{10} y la distribución de tamaño del material particulado. Estos análisis buscan esclarecer el origen del material

particulado y dar información que permita enfocar adecuadamente los esfuerzos para reducir las concentraciones atmosféricas del contaminante. A continuación se resumen algunas experiencias sobre esta materia.

2.1. Distribución de tamaño

El material particulado posee gran diversidad de tamaño. Es un sistema de tres fases, partículas sólidas y líquidas suspendidas en un gas. Reist (1993) lo define como un aerosol polidisperso. Conocer la distribución de tamaño de este contaminante permite, junto con información adicional, esclarecer el posible origen del mismo, entender los procesos atmosféricos que lo forman, sus interacciones con el sistema respiratorio humano y sus efectos sobre la salud. Una típica distribución másica de tamaño, se muestra en la Figura 1. En las ordenadas se encuentra el diámetro aerodinámico de las partículas en escala logarítmica, y en las abscisas la concentración másica relativa.

La distribución másica de tamaño se clasifica en rangos y modos. Los rangos de PM₁₀ y PST son los medidos comúnmente por la mayoría de las autoridades ambientales en nuestro país, y por sus pares en otras latitudes. En algunos países, especialmente en los desarrollados, se mide recientemente PM_{2.5}. La fracción de PST, abarca el rango de partículas entre 0 y 40 μm de diámetro aerodinámico aproximadamente. La fracción de PM₁₀ desde 0 hasta 10 μm aproximadamente y la fracción de PM_{2.5} desde 0 hasta 2,5 μm de diámetro aerodinámico aproximadamente (Chow et al. 1998).

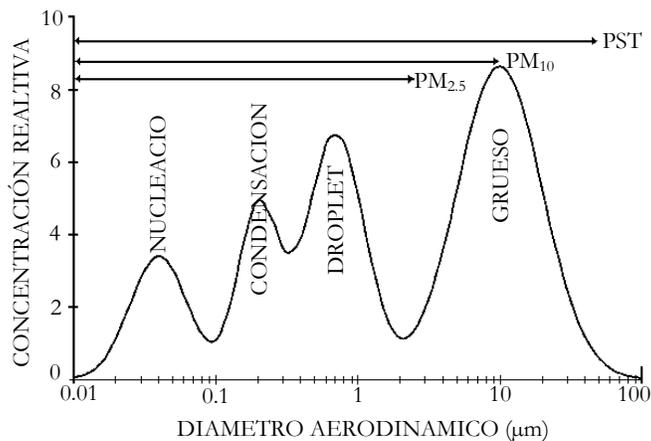


Figura 1: Distribución másica de tamaño de las partículas en la atmósfera. (Adaptado de Chow et al, 1998)

En la Figura 1 el pico observado en $0,2 \mu\text{m}$ corresponde a la condensación de productos de reacciones en fase gaseosa. El que se presenta a $0,7 \mu\text{m}$ corresponde a droplets resultantes de la agregación de partículas de diámetros menores, provenientes de reacciones que ocurren dentro de pequeñas gotas de agua. El rango de partículas ultra finas va desde 0 hasta $0,08 \mu\text{m}$ aproximadamente. Las partículas de este diámetro son emitidas directamente en procesos de combustión o las conforman condensados de gases enfriados rápidamente (Chow et al. 1998).

Se denomina modo de acumulación al que va desde $0,08$ y $2 \mu\text{m}$ aproximadamente. Las partículas cuyo diámetro aerodinámico se encuentra dentro de este rango son resultantes de la agregación de partículas más pequeñas emitidas de fuentes de combustión, y/o de conversión de gas a partícula, y/o de condensación de especies volátiles y/o polvo fino del suelo (Chow et al. 1998). Estos dos últimos tipos de partículas, las ultrafinas y las de acumulación, constituyen el rango de partículas finas. La mayoría del ácido sulfúrico, bisulfato de amonio, sulfato de amonio, nitrato de amonio, carbono orgánico y carbono elemental se encuentra en las partículas en este rango de diámetro aerodinámico (Chow et al. 1998).

En la práctica, las distribuciones másicas de tamaño encontradas varían de acuerdo con la meteorología y las fuentes que incidan en el sitio de monitoreo, la hora del día y la época del año en que se realice el mismo. Varios autores como Koch (2000) recopilan y analizan distribuciones de tamaño de material particulado de varias ciudades del mundo como Bombay, Ponte Puerto Rico, Ciudad de México y Yakarta, mientras que otros como Hitzenberger (2004) analizan distribuciones de material particulado en condiciones de alta y de baja contaminación.

En el caso de Bogotá, Buendía (sin publicar) realizó algunos monitoreos de la distribución de tamaño del material particulado en sitios como el campus de la Universidad de Los Andes y la estación de monitoreo de la red de calidad del aire de Bogotá ubicada en la Universidad Santo Tomás. Ambos, sitios cercanos al centro de la ciudad y a los cerros orientales. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos por Buendía (sin publicar). Puede apreciarse un pico de concentración másica cercano a los $10 \mu\text{m}$ y el valle cerca de los $2,5 \mu\text{m}$, reportados en la literatura, pero no es posible observar los picos de nucleación y condensación. Los resultados muestran que gran parte de la masa de material particulado recogido en ambos sitios de monitoreo se encuentra en la fracción gruesa, pero en el sitio ubicado en Uniandes se encuentra una masa importante en la fracción fina.

Cabe anotar que las tecnologías utilizadas en la actualidad en las mediciones de este contaminante no están en capacidad de separar en un diámetro exacto las partículas que miden. Es decir las mediciones de una fracción determinada, por ejemplo $\text{PM}_{2,5}$, incluyen una porción de partículas más pequeñas y más grandes que este diámetro. (McMurry 2000, Chow et al. 1998).

2.2 Relación entre el PM_{2,5} y el PM₁₀

La relación entre el PM_{2,5} y el PM₁₀ representa la cantidad de material fino, casi todo de origen antrópico, y el total de partículas menores a diez micras presentes en la atmósfera. Esta relación permitiría estimar la concentración de un parámetro conociendo el otro. Si se conoce esta relación en una ciudad, se cuenta con parte de la información necesaria para tomar acciones de control mas adecuadas sobre las fuentes.

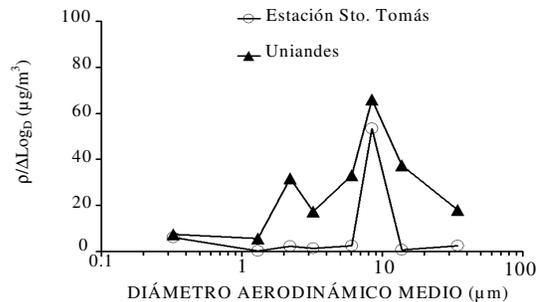


Figura 2: Distribuciones de tamaño de material particulado en dos puntos de la ciudad de Bogotá. (Adaptado de Buendía, Sin publicar).

La relación PM_{2,5}/PM₁₀ ha sido determinada por numerosos estudios llevados a cabo en ciudades latinoamericanas y del mundo. Valores encontrados por varios autores para la relación PM_{2,5}/PM₁₀ en diferentes ciudades y países del mundo, incluyendo los resultados obtenidos en este trabajo para Bogotá, se presentan en la Tabla 1.

Existe diversidad en los valores encontrados para la relación originada principalmente en las diferencias geológicas, climáticas, atmosféricas, y en las diversas fuentes de contaminación, que aun dentro de una misma ciudad influyen cada sitio de monitoreo (Rodríguez et al. 2003).

2.3 Composición química

El material particulado además de ser complejo desde el punto de vista físico, también es químicamente muy diverso y en él se puede encontrar, componentes de origen natural y de origen antrópico. Las especies químicas que conforman el material particulado y el origen de cada una pueden resumirse de la siguiente manera (Harrison et al. 2000, Chow et al. 1998):

Los sulfatos se derivan de la oxidación del dióxido de azufre presente en la atmósfera. El sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄), el bisulfato de amonio ((NH₄)HSO₄), y el ácido sulfúrico (H₂SO₄), son las especies que se encuentran comúnmente en la atmósfera y se generan durante la conversión de gases en partículas. Son solubles en agua y se encuentran casi exclusivamente en el PM_{2,5}.

Los nitratos se forman por oxidación del dióxido de nitrógeno atmosférico, y de una forma del nitrato de amonio. Se cree que se encuentran en equilibrio en la atmósfera con sus precursores, el gas amoniacal, y el vapor del ácido nítrico.

El ácido sulfúrico y el ácido nítrico presentes en la atmósfera forman nitratos y sulfatos que luego son neutralizados gradualmente por el amoniacal, formando sales de amonio.

El carbono elemental y carbono orgánico, en forma de partículas, provienen de los procesos de combustión. Estas partículas están formadas por un centro de carbono elemental, cubierto por una capa superficial de compuestos orgánicos semivolátiles. Puede incorporarse más carbono orgánico a estas partículas como resultado de procesos fotoquímicos atmosféricos que producen hidrocarburos de baja volatilidad.

Tabla 1. Relaciones PM_{2,5}-PM₁₀ para diferentes ciudades y países del mundo.

Lugar	Fuente	Relación PM _{2,5} /PM ₁₀				
Bogotá, Colombia	(Presente trabajo)	IDRD: 0,45	Sony: 0,19	Cazucá: 0,73	Bosque: 0,12	Kennedy: 0,42
Bogotá	(Larsen, sin publicar)	0,60				
México	(Romieu et al. 1997)	DF: 0,50–0,70				
Santiago, Chile	(Romieu et al. 1997)	Invierno: 0,60	Verano: 0,40			
Birmingham, UK	(Harrison et al. 1997)	Invierno: 0,80	Verano: 0,50			
Italia	(D'Innocenzio et al. 1998)	0,58				
Holanda	(Janssen et al. 1997)	0,57				
Alemania	(Kainka et al. 1997)	0,70–0,80				
España	(Rodríguez et al. 2003) País Vasco	0,74	Islas Canarias: 0,40	Barcelona: 0,60	Tarragona: 0,62	
Estados Unidos	(US EPA. 2003)	Este: 0,75	Centro: 0,52	Oeste: 0,53		
Sydney, Australia	(Cohen. 1999)	0,29–0,53				
Hong Kong, China	(Ho et al. 2003)	0,53–0,78				

El material geológico está conformado por materiales provenientes de la corteza terrestre, como polvo del suelo y minerales desprendidos por acción del viento sobre las rocas, constituidos de óxidos de aluminio, silicio, calcio, titanio, hierro y otros óxidos metálicos. Estos materiales tienen una composición muy diversa y reflejan la

geología y la actividad de procesos industriales como la siderurgia, fundición, minería, y la producción de cemento. La concentración de estos materiales depende principalmente del clima, favoreciéndose con los vientos fuertes y baja humedad. Se encuentran casi siempre en la fracción gruesa y constituyen típicamente el 50% del PM₁₀ y sólo del 5 al 15% del PM_{2,5}.

Los metales pesados son elementos que se encuentran en muy pequeñas cantidades y que provienen principalmente de algunos procesos de combustión, de algunos procesos industriales específicos, de incineradores, de antidetonantes de gasolinas y de aceites de motores de combustión interna.

Los materiales biológicos que pueden incluir bacterias, virus, polen, piel, esporas y fragmentos de celulosa. A excepción de los virus, estos elementos se encuentran en la fracción gruesa del material particulado, entre 2,5 µm y 10 µm y se caracterizan como carbono orgánico.

Otros compuestos como cloruro de sodio y vapor de agua conforman también parte del material particulado de la atmósfera

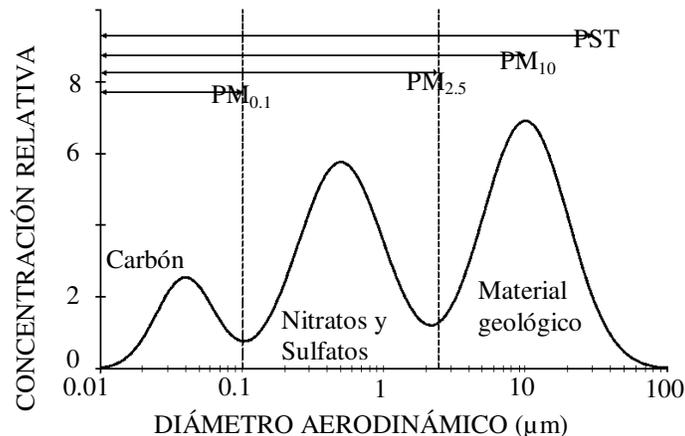
La Figura 3 representa la composición química de las principales fracciones del material particulado sobre una distribución de tamaño esquemática.

Como la Figura 3 lo representa, la mayoría de las partículas de origen antrópico tiene diámetros aerodinámicos menores a 2,5 µm, mientras que las partículas del material geológico y el polen tienen diámetros aerodinámicos superiores.

El análisis químico de material particulado de diferentes tamaños ha sido realizado por muchos autores en muchas locaciones alrededor del mundo, Harrison et al. (2000), Cohen (1999), Cahill et al. (1996) y Cohen et al. (2002) recopilan y comparan varios trabajos sobre este tema.

En Bogotá, Páez (1998) y Roa (1999) realizaron análisis químico de metales pesados en la fracción de PST y PM₁₀. Cala (2004) realizó análisis termogravimétricos y polarografías a muestras de PM₁₀, para determinar carbono orgánico y elemental junto con metales pesados. García (2004), realizó análisis químicos de muestras de PM₁₀ recopiladas en poblaciones cercanas a Bogotá, en busca algunos metales pesados y hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Figura 3: Composición química dominante en cada rango de tamaño del material particulado atmosférico. (La distribución de tamaño es meramente representativa) (Adaptado de US EPA, 1998).



3 Métodos e instrumentos

Para la realización de esta investigación se utilizó la infraestructura de monitoreo de la red de calidad del aire de Bogotá, conformada por doce estaciones de monitoreo automáticas, dos estaciones meteorológicas puras y una estación DOAS, distribuidas en diferentes zonas de la ciudad. En las doce estaciones automáticas de la red se mide PM₁₀ y tres de ellas se mide PST. Cinco estaciones automáticas de la red, se emplearon en este estudio, seleccionadas de acuerdo con su ubicación en la ciudad, las fuentes de contaminación que las influyen y la disponibilidad de equipos de monitoreo.

La red de calidad del aire de Bogotá utiliza monitores de partículas BAM, de dos marcas Metone-BAM1020 y Dasibi 7001. Estos monitores funcionan empleando el principio de atenuación de radiación beta, para estimar la masa de material particulado muestreado durante periodos horarios.

Inicialmente se realizó una comparación de los resultados de monitoreo de PM₁₀ obtenidos con el BAM Dasibi 7001 en la estación Sony, contra el método gravimétrico de referencia para este contaminante (muestreo de alto volumen), en una campaña de 1 mes de duración, entre el 27 de abril de 2005 y el 23 de mayo de 2005, en la que se tomaron cuatro muestras, cada una durante tres días de monitoreo, con el objetivo de validar de los resultados obtenidos por la red de calidad del aire. Para realizar los muestreos gravimétricos se utilizó un equipo PM₁₀ Hi-Vol Andersen/GMW 1200 equipado con un inlet de selección por tamaño de partícula (SSI). Se emplearon filtros de fibra de cuarzo Whatman QM/A para recoger las muestras de material particulado. Los filtros se acondicionaron en un desecador, a temperaturas entre 17 y 22 °C, por 24 horas antes del inicio de las mediciones. Una vez obtenidas las muestras, se prepararon nuevamente bajo las mismas condiciones y durante el mismo tiempo. Luego de ser

acondicionados, los filtros fueron pesados en una balanza Ohaus Analytical Plus AP250D, con un límite de detección de 1×10^{-5} g.

Posteriormente se realizaron mediciones simultáneas de PM_{2,5} y PM₁₀ en cinco estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá, durante periodos de aproximadamente dos meses en cada una, empleando los equipos BAMs Dasibi 7001 para monitorear PM₁₀ los Metone-BAM1020 para PM_{2,5}. Antes del inicio del monitoreo, los flujos de los equipos fueron calibrados contra un estándar NIST, utilizado por la red de calidad del aire de Bogotá, para referenciar todos sus equipos BAM.

En la estación ubicada en la sede del Instituto Distrital de Recreación y Deporte IDRDR en el centro-occidente de la ciudad, localidad de barrios unidos, se monitoreó desde el 15 de octubre de 2004 al 25 de enero de 2005. En la estación, ubicada en el edificio de la empresa Sony Music, al sur de la ciudad, localidad de Kennedy, se monitoreó desde el 7 de marzo de 2005 al 18 de abril de 2005. En la estación, ubicada en el edificio de la empresa Intecplast, en la zona industrial de Cazucá, al suroccidente de la ciudad, se monitoreó entre el 25 de abril de 2005 y el 18 de mayo de 2005. En la estación Bosque, ubicada en la Universidad del Bosque, al norte de la ciudad, localidad de Usaquén, se monitoreó desde el 23 de mayo de 2005 al 18 de julio de 2005. Por último en la estación Kennedy, ubicada en el parque Cayetano Cañizales, al suroccidente de la ciudad, localidad de Kennedy se monitoreo desde el 12 agosto a octubre 24 de 2005.

Se obtuvieron datos horarios de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se realizó un análisis exploratorio de estos datos y se descartaron valores atípicos y extremos. Posteriormente se organizaron conjuntos de datos, de acuerdo con diferentes condiciones meteorológicas y diferentes horas del día, tales como vientos en calma ($< 0,5$ m/s) o vientos fuertes ($> 0,5$ m/s), con lluvia o sin lluvia, en la noche, o durante el día y en horas pico de emisión en la mañana (7,8, 9,10 a.m.) con el objeto de analizar la variación de la relación PM_{2,5}/PM₁₀ en diferentes condiciones. Finalmente, se realizó un análisis de regresión con cada conjunto de datos, además de un análisis de correlación bivariada.

Paralelamente, se realizaron muestreos con dos impactadores de cascada: un impactador Thermo Electron (Andersen), de ocho etapas serie 20-800 Mark II, propiedad de la Universidad de La Salle, y el impactador Uniandes, de siete etapas, diseñado y construido por la Universidad de los Andes. Se emplearon filtros de fibra de cuarzo Whatman QM/A de 55 mm Ø para el impactador Uniandes y de 83 mm Ø para el impactador Thermo Electron Mark II, colocados sobre los platos de impactación, como sustrato para recoger las muestras de material particulado. Los filtros se acondicionaron en un desecador, a temperaturas entre 17 y 22 °C, por 24 horas antes del inicio de las mediciones. Una vez obtenidas las muestras, se adecuaron bajo las mismas condiciones y la misma duración. Una vez acondicionados, los filtros fueron pesados en una balanza Ohaus Analytical Plus AP250D, con un límite de detección de 1×10^{-5} g.

Las muestras fueron tomadas a un flujo de 45 pies cúbicos estándar por hora (SCFH) en el impactador Uniandes y a 60 SCFH en el impactador Thermoelctron Mark II. Los sitios donde se llevaron acabo los monitoreos, fueron el edificio del Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos INVIMA, ubicados en la zona centroccidental de la ciudad; corredor industrial de Puente Aranda. Se realizaron cinco muestreos, cuatro de ellos en el edificio del INVIMA, durante 7 días cada uno, en los meses de enero a junio de 2005.

4 Resultados y discusión

La comparación de las concentraciones de PM_{10} obtenidas por el método gravimétrico de referencia y las registradas con el equipo BAM Dasibi 7001 en la estación Sony, reveló diferencias del orden de $\pm 10\%$, esperables, según lo reportado por McMurry (2000).

En cuanto a la medición simultánea de PM_{10} y $PM_{2,5}$, la Tabla 2 muestra las medias y desviaciones estándar de los promedios horarios de $PM_{2,5}$ y PM_{10} en las cinco estaciones empleadas en la investigación.

El análisis de regresión y el análisis de correlación bivariada de los datos horarios muestran una fuerte, significativa y positiva correlación lineal entre PM_{10} y $PM_{2,5}$ en las estaciones estudiadas, aunque en las estaciones Sony y Bosque la correlación es más débil que en IDRD, Kennedy y Cazucá.

Tabla 2. Media y desviación estándar de las mediciones de $PM_{2,5}$ y PM_{10}

Estación	$PM_{10} \mu\text{g}/\text{m}^3$		$PM_{2,5} \mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Media	Desviación Estándar	Media	Desviación Estándar
Sony	105,92	33,91	35,71	10,19
IDRD	100,89	27,30	46,73	13,64
Cazucá	81,17	55,34	56,50	43,16
Bosque	49,14	29,81	18,36	9,28
Kennedy	77,64	44,60	44,22	22,24

El coeficiente de Pearson obtenido para las estaciones IDRD, Kennedy y Cazucá fue mayor a 0,80, mientras que en Sony fue 0,65 y en Bosque 0,36. La covarianza fue positiva en todos los casos. El intervalo de confianza observado en la correlación bivariada nunca fue menor al 95% en ninguna estación, todo lo cual nos lleva a confirmar la existencia de una correlación lineal. En todos los análisis se tomó como variable dependiente $PM_{2,5}$ y variable independiente PM_{10} . Los resultados se muestran en la Tabla 3. Los valores de relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ con diferentes condiciones meteorológicas y a diferentes horas del día se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Resultados de análisis estadísticos para las cinco estaciones.

Estación	R ²	Relación PM _{2,5} /PM ₁₀	Coefficiente de Pearson	Intervalo de Confianza
Sony	0,419	0,192	0,647	95%
IDRD	0,810	0,450	0,900	99%
Cazucá	0,844	0,727	0,919	99%
Bosque	0,144	0,119	0,380	99%
Kennedy	0,618	0,416	0,835	99%

Tabla 4. Resumen de resultados relación PM_{2,5}/PM₁₀ para diversas condiciones meteorológicas y diferentes horas del día.

Estación	Sony	IDRD	Cazucá	Bosque	Kennedy
Todos los datos	0,192	0,450	0,727	0,119	0,416
Horas pico mañana	0,201	0,190	0,548	0,095	0,412
Noche	0,221	0,346	0,814	0,337	0,427
Día	0,188	0,173	0,608	0,121	0,410
Calma, < 0,5 m/s	0,242	0,295	0,682	0,176	0,431
Vientos, > 0,5 m/s	0,199	0,182	0,678	0,116	0,319
Con lluvia	0,173	0,184	0,525	0,069	0,290
Sin lluvia	0,213	0,209	0,713	0,117	0,375

Las distribuciones de tamaño de material particulado obtenidas mediante los monitoreos con los impactadores de cascada, se calcularon con los pesos de cada filtro y los diámetros de corte de cada etapa de los impactadores, de acuerdo con la metodología expuesta por Reist (1993). Estos cálculos incluyeron la corrección de flujos a las condiciones de presión y temperatura en Bogotá. Las curvas obtenidas en las dos locaciones en la zona industrial de Puente Aranda se muestran en las Figuras 4-5.

5 Análisis de resultados

Los resultados de la comparación de las concentraciones de PM_{10} , obtenidas con el método gravimétrico de referencia y con el equipo BAM Dasibi 7001 en la estación Sony, concuerdan razonablemente. Las discrepancias entre los dos métodos pueden tener origen en diferencias en el diámetro de partícula en los cuales los inlets de selección de tamaño separan el material particulado medido, en errores en la medición de los flujos, o en errores asociados con la relación número atómico a masa atómica del material particulado asumida por el método BAM como lo señala McMurry (2000).

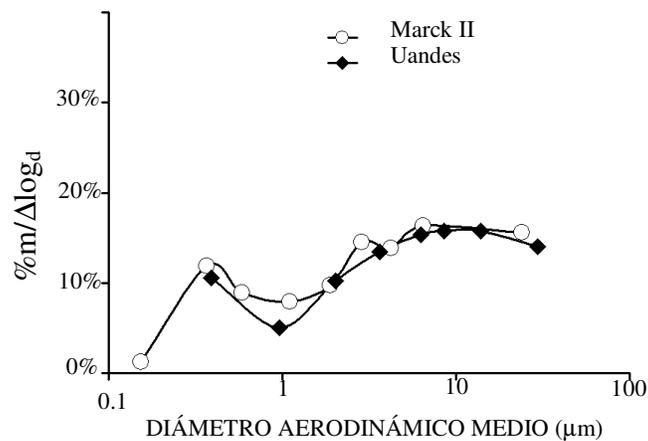


Figura 4: Distribuciones de tamaño obtenidas con el impactador Thermoelectron Mark II, y el impactador Uniandes entre 20/04/2005 y 27/04/2005 en el edificio del INVIMA.

La limitación de tener un sólo equipo de medición de $PM_{2.5}$ para este estudio implica que no es plausible realizar comparaciones directas entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ entre estaciones de monitoreo, pues para ello se deberían realizar mediciones simultáneas en todas. Además implica no poder analizar las variaciones estacionales de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$, que han sido bien documentadas (Watson J. & Chow J. 1997, 2002, Cohen. 1999), dada la extensión del estudio.

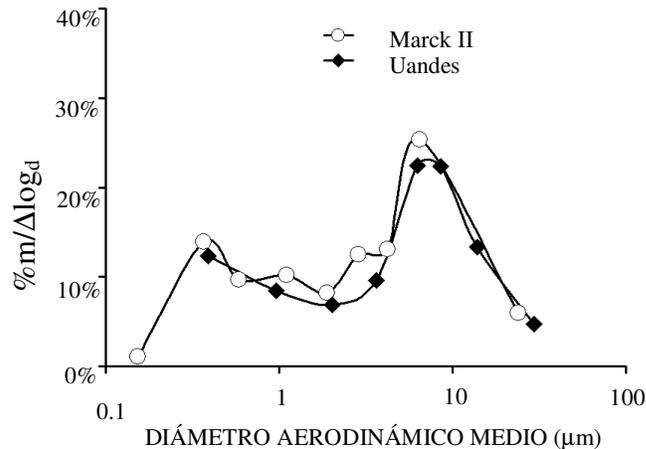


Figura 5: Distribuciones de tamaño obtenidas con el impactador Thermolectron Mark II, y el impactador Uniandes entre 18/05/2005 y 25/05/2005 en el colegio la Merced.

Los valores obtenidos para la relación PM_{2,5}/PM₁₀ de en las diferentes estaciones concuerdan adecuadamente con lo encontrado por otros investigadores en otras locaciones como se muestra en la Tabla 1, excepto en las estaciones Bosque y Sony donde la relación es muy baja. Es decir el material particulado fino (menor a 2,5 micras) se encuentra en menor proporción en la fracción menor a 10 micras. Una relación superior a 0,60 sería esperable bajo la influencia directa de fuentes de combustión, mientras que se esperaría una relación inferior a 0,30 bajo la influencia directa de polvo resuspendido o erosión. (Querol et al. 2004).

La estación Sony está ubicada en una zona principalmente industrial, con vías en regular estado y a 50 m de la autopista sur. En este sitio, se obtuvo una relación 0,192 PM_{2,5}/PM₁₀. Se esperaría una relación mayor dada la cercanía de un vía importante y de fuentes industriales. Sin embargo, durante el desarrollo de la medición, la autopista sur estaba siendo sometida a intensos trabajos de adecuación, para el sistema Transmilenio, así como a la ampliación de sistemas de acueducto y alcantarillado. Estos trabajos implican excavaciones, fundición de concreto, etc., eventos que indudablemente afectaron, los resultados de la relación, aumentando la cantidad de material particulado grueso en la zona. El bajo coeficiente de correlación de Pearson para esta estación indica que la interacción entre los efectos de las fuentes y los parámetros es compleja, quizás no lineal y no permite una predicción de datos de PM_{2,5} a partir de la medición de datos de PM₁₀ únicamente.

La estación IDRDR está localizada en una zona que no tiene influencia directa de grandes industrias, aunque está cerca a avenidas con alto flujo vehicular. La relación PM_{2,5}/PM₁₀ de 0,450 en esta estación indica la influencia de fuentes de combustión en la zona. El coeficiente de Pearson de 0,900 y el intervalo de confianza del 99% permite

afirmar que es posible predecir adecuadamente los datos de $PM_{2,5}$ a partir de datos de PM_{10} en esta estación.

La estación Cazucá está ubicada en una zona industrial, principalmente compuesta por pequeñas y medianas empresas, a 100 m de la autopista sur, y en la falda de los cerros de Cazucá. La zona tiene vías en regular estado y flujo regular de camiones pesados. La relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ de 0,727, junto con la alta concentración de $PM_{2,5}$ (media 56,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), las más altas obtenidas entre los sitios de monitoreo estudiados, refleja la fuerte influencia de procesos de combustión, que puede provenir tanto de vehículos como de industrias. En contraste, la concentración de PM_{10} , baja, muestra que no existe una influencia significativa de material geológico, generado por procesos mecánicos (Querol et al. 2004). El coeficiente de correlación de Pearson de 0,919, muestra una alta linealidad, y un intervalo de confianza de 99% permiten afirmar que es posible predecir adecuadamente las concentraciones de $PM_{2,5}$ a partir de datos de PM_{10} . Como en el caso de la estación IDRDR, sería un mecanismo o fuente común el responsable del aumento o reducción en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$.

En la estación Bosque se registró una relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ de 0,119, que indica una influencia mas significativa de polvo resuspendido o erosión en el punto de monitoreo, el cual se encuentra cercano a los cerros orientales de la ciudad, en la zona norte, cerca de la carrera séptima y la calle 134. En esta zona los cerros orientales han sido despojados de su cobertura vegetal. La baja relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en esta estación podría explicarse por material geológico arrastrado por los vientos predominantes, que soplan del sur oriente en este punto de la ciudad. También puede estar implicado en la medición un error causado por la diferencia de 3 m entre la altura del tomamuestras de $PM_{2,5}$ y el de PM_{10} de esta estación.

La estación Kennedy, se encuentra a 40 metros de la Av. Cra 86, cerca al mayor centro de acopio de productos agrícolas de la ciudad. La zona soporta alto tráfico de vehículos pesados. En este punto la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ fue 0,416, lo que indica una influencia significativa de fuentes de combustión en el sitio.

La influencia de factores meteorológicos como la lluvia, los vientos y de la actividad humana como las horas pico de tráfico vehicular, el día y la noche dio como resultado, como es esperable, una variación en las relaciones $PM_{2,5}/PM_{10}$.

Durante las horas pico de la mañana, horas en las cuales se dan las mayores concentraciones de material particulado en la ciudad (DAMA, 2004), en todas las estaciones, excepto en Sony, se presenta un disminución en el valor de la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ con respecto a la obtenida al analizar todos los datos. Este hecho puede indicar mayor influencia del material particulado grueso en estas horas. De igual manera sucede al analizar el conjunto de datos obtenidos durante las horas diurnas, excepto en la estación Bosque. En las horas de la noche, la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ aumenta en todas las estaciones, menos en IDRDR, esto puede indicar mayor influencia de las fuentes de combustión industriales en estas horas.

Las concentraciones obtenidas con vientos en calma, con velocidades menores a 0,5 m/s, arrojan relaciones menores a las obtenidas con todos los datos en las estaciones IDRDR y Cazucá, lo cual puede indicar una mayor influencia de material particulado grueso de fuentes cercanas a los puntos de monitoreo. Con vientos fuertes, la relación PM_{2,5}/PM₁₀ sube solo en la estación Sony, indicando un posible incremento de la influencia de fuentes de combustión lejanas de este punto de monitoreo.

La relación PM_{2,5}/PM₁₀ es mayor en todas las estaciones al analizar el conjunto de datos recogidos durante el tiempo seco que cuando llueve. Esto podría indicar que cuando llueve, existe mas material particulado grueso en la atmósfera. La lluvia puede entonces lavar parte del material particulado fino.

Al analizar la distribución de tamaño del material particulado de los dos puntos de la localidad de Puente Aranda, se encontró aproximadamente el mismo porcentaje de masa de material particulado, en ambos sitios de monitoreo, mientras que en el edificio del INVIMA se encontró menos masa de material particulado grueso. Al encontrarse a mayor altura, 6m aproximadamente, en el sitio de monitoreo del INVIMA pueden recogerse menos partículas originadas por procesos de fricción que en el colegio La Mercedes, sitio de monitoreo ubicado a 2 m de altura y a menos de 5 m de una vía.

6 Conclusiones

Las concentraciones de PM₁₀ en la estación Sony reportadas por el equipo BAM Dasibi 7001, coinciden adecuadamente con las concentraciones encontradas con el método gravimétrico de referencia.

La linealidad de la relación PM_{2,5}/PM₁₀ en las estaciones IDRDR, Kennedy y Cazucá permite utilizar datos de PM₁₀ para predecir con confianza la concentración de PM_{2,5} que pueden ser utilizados en estudios de relaciones entre este contaminante y la salud de la población en las localidades representadas por estas estaciones. En estas estaciones la relación PM_{2,5}/PM₁₀ demuestra una mayor influencia de fuentes de combustión.

Los datos de PM_{2,5} no son predecibles a partir de datos de PM₁₀ en las estaciones Sony y Bosque. Sería necesario monitorear PM_{2,5} de manera directa y estudiar con detalle las interacciones entre las fuentes y las variables meteorológicas alrededor de estas estaciones. En estas estaciones la relación PM_{2,5}/PM₁₀ demuestra una mayor influencia de fuentes de de material particulado grueso.

En los sitios de monitoreo localizados en la localidad de Puente Aranda, al rededor del 15% de la masa de material particulado puede estar compuesta por carbón, nitratos y sulfatos provenientes de fuentes de combustión, formados en la atmósfera muy probablemente por procesos de de nucleación y condensación.

7 Recomendaciones

La autoridad ambiental debe realizar campañas de intercomparación de mediciones de PM_{10} contra el método gravimétrico de referencia, en todas las estaciones de monitoreo, para determinar la exactitud de las mediciones reportadas por los monitores BAM.

Es necesario continuar con el monitoreo de $PM_{2,5}$ y de la distribución de tamaño del material particulado alrededor de la ciudad para determinar la relación $PM_{2,5}/PM_{10}$ en el resto de la ciudad y a futuro poder establecer una norma para este contaminante en la ciudad. Los resultados de este trabajo no deben emplearse para remplazar la medición directa de $PM_{2,5}$, sino como indicadores de para realizar estudios de salud pública y en la determinación de la efectividad de diversas medidas para mejorar la calidad del aire en la ciudad.

Es necesario determinar la contribución de las diversas fuentes al material particulado en cada zona de la ciudad por medio de la caracterización química del material particulado del aire y la aplicación de modelos de balance de masas o similares.

Referencias

- [1] Buendía, V. 2004. Trabajo sin publicar. Bogotá. Universidad de los Andes.
- [2] Cahill T. et al. 1996. *Comparative aerosol studies of Pacific rim cities*. Santiago, México and Los Angeles. Atmospheric Environment. 30. 5 :747-749.
- [3] Cala J. 2004. *Muestreo y análisis de partículas PM_{10} , como contaminantes del aire*. Bogotá. Universidad de los Andes.
- [4] Chow, J.& Watson, J. 1998. *Guideline on speciated particulate monitoring*. Desert Research Institute, Reno. US-EPA.
- [5] Cohen D. 1999. *Seasonal and regional variations in ambient fine particle concentrations and sources in New South Wales, Australia. A seven year study*. Proceedings of international congress of biometeorology and international conference on urban climatology. Sydney.: 607.
- [6] Cohen D. et al. 2002. *Characterization of $PM_{2,5}$ and PM_{10} fine particle pollution in several Asian regions*. 16th international clean air conference.
- [7] Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente DAMA. 2004. Informe anual de calidad del aire. Bogotá.
- [8] D'Innocenzio, F. et al. 1998. *PM_{10} and $PM_{2,5}$ concentrations in urban air and size fraction distribution of toxic metals*. Annali di Chimica. 88:281-289.
- [9] García H. 2004. *Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos y metales en partículas de áreas industriales y urbanas*. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.

- [10] Green, L. C. 2002. *What's wrong with the national ambient air quality standard (NAAQS) for fine particulate matter (PM_{2,5})?*. Regulatory toxicology and pharmacology 35: 327–337.
- [11] Harrison R. et al. 1997. *Sources and Processes Affecting Concentrations of PM₁₀ and PM_{2,5} Particulate Matter in Birmingham UK*. Atmospheric Environment 31: 4103-4117.
- [12] Harrison, R. 2000. *Particulate matter in the atmosphere. Which particle properties are important for its effects on health?* The Science of the Total Environment 249: 85-101.
- [13] Hitzenberger, R. et al. 2004. *Intercomparison of methods to measure the mass concentration of the atmospheric aerosol during INTERCOMP2000 - Influence of instrumentation and size cuts*. Atmospheric Environment. 38:6467-6476.
- [14] Ho K. et al. 2003. *Characterization of chemical species in PM_{2,5} and PM₁₀ aerosols in Hong Kong*. Atmospheric Environment. 37:31–39.
- [15] IDEAM. 2002. *Auditoria a la Red de Monitoreo de Calidad el Aire de Bogotá*. Bogotá. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- [16] Janssen, N. et al. 1997. *Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations*. Atmospheric Environment. 31:1173-1184.
- [17] Kainka, E. et al. 1997. *Characterization of particulate matter PM₁₀ and PM_{2,5} in North Rhine Westphalia, Saxony and Lithuania - first results*. Inhaled Particles VIII: Proceedings of an International Symposium on Inhaled Particles organized by the British Occupational Hygiene. Annals of Occupational Hygiene. : 54-59
- [18] Koch, M. 2000. *Airborne fine particulates in the environment: A review of health effect studies, monitoring data and emission inventories*. Interim Report IR-00-004. International Institute for Applied Systems Analysis.
- [19] Larsen, B. 2004. *Environmental damage cost. A study of Colombia*. Trabajo sin publicar.
- [20] McMurry, P. 2000. *A review of atmospheric aerosol measurements*. Atmospheric Environment. 34:1959-1999.
- [21] Páez C. 1998. *Determinación de metales en las partículas del aire*. Bogotá. Universidad de Los Andes.
- [22] Querol, X. et al. 2004. *Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2,5} in selected European cities*. Atmospheric Environment 38: 6547–6555.
- [23] Reist, P. 1993. *Aerosol science and Technology*. Second edition. New York. McGraw–Hill.
- [24] Roa M. 1999. *Medición de metales en las partículas del aire*. Bogotá. Universidad de Los Andes.

-
- [25] Rodríguez, V. et al. 2003. *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la península Ibérica y Canarias*. Barcelona. Politécnico de Cataluña.
- [26] Romieu, I. et al. 1997. *Particulate air pollution and daily mortality: Can results be generalized to Latin American countries?*. *Salud Publica en México*. 39:403-411.
- [27] US Environmental Protection Agency. *Guidance for using continuous monitors in PM_{2,5} monitoring networks*. Office of Air Quality Planning and Standards (1998).
- [28] US Environmental Protection Agency. 2003. *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. National Center for Environmental Assessment-RTP Office. Office of Research and Development. Vol 1.
- [29] US Environmental Protection Agency. *National Center for Environmental Assessment-RTP Office*. Office of Research and Development Air Quality Criteria for Particulate Matter. Vol 1. US Environmental Protection Agency. Research Triangle Park. 2003.
- [30] Watson J. & Chow J. 1997. *Analysis of historical PM₁₀ and PM_{2,5} measurements in Central California. Draft report*. Desert Research Institute. Reno. Prepared for California regional particulate air quality study, California Air Resources Board, Sacramento.
- [31] Watson J. & Chow J. 2002. *Chemical composition of PM_{2,5} and PM₁₀ in Mexico City during winter 1997*. *The Science of the Total Environment* 287:177-201
- [32] WHO. 2000. *Air quality Guidelines*. Copenague. World Health