

# Relación entre $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$ en la ciudad de Bogotá

## Rojas, Néstor

Ingeniero Químico. PhD en el Departamento de Combustibles y Energía de la Universidad de Leeds, Reino Unido. Investigador en emisiones de partículas de motores diesel. Profesor Asistente en el Departamento de Ingeniería Química. Universidad de los Andes.

## Galvis, Boris

Ingeniero Químico. Estudiante de Maestría en Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes. Coordinador de la Red de Calidad del aire. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente DAMA, Bogotá.

Recibido 10 de septiembre de 2005, aprobado 29 de octubre de 2005-11-10

**PALABRAS CLAVES:** Contaminación del aire, material particulado,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ .

**KEY WORDS:** Air pollution, Particulate Matter,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ .

**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 varias estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Bogotá y se analizaron los resultados con herramientas estadísticas. Los resultados del análisis muestran una correlación positiva y lineal entre los dos parámetros.

**ABSTRACT** Simultaneous monitoring of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  was carried out during two-month periods at three air-quality monitoring stations in Bogotá. The data gathered were statistically analyzed looking for evidence of correlations between  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$ . Results show a positive linear correlation between the two parameters.

## INTRODUCCIÓN

Recientemente se ha discutido en círculos académicos y al interior de las autoridades ambientales sobre la necesidad de monitorear  $PM_{2.5}$  (concentración másica de partículas suspendidas en el aire, de un tamaño inferior a 2.5 micras, en  $\mu\text{g}$  de partículas /  $\text{m}^3$  de aire) además de  $PM_{10}$  (concentración de partículas de tamaño inferior a 10 micras, en las mismas unidades) en la ciudad de Bogotá, dado que existe evidencia de estudios internacionales según la cual las partículas más finas tienen una mayor asociación con los indicadores de mortalidad y morbilidad de la población. 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 distribución espacial y temporal de  $PM_{2.5}$  en la ciudad y su relación con  $PM_{10}$ . Este artículo resume esfuerzos iniciales realizados con el objeto de conocer 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. 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  $10 \text{ g/m}^3$  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, 2003; Green, 2002), esta asociación continúa siendo aceptada por la mayor parte de las agencias de protección ambiental 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 ciertos 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 (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, 2003). En tal caso, sería más conveniente una medición de partículas de acuerdo a su concentración en número de partículas por cada  $\text{m}^3$  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, 2003).

Dada la controversia, debería considerarse muy cuidadosamente la instalación de costosos 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. La ciudad ya cuenta con un equipo para la medición de  $PM_{2.5}$ , el cual puede llevarse de una estación a otra, en campañas cortas que permitan 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, con la utilización de un solo equipo de medición de  $PM_{2.5}$ , y cómo en otras estaciones debería utilizarse una medición permanente de  $PM_{2.5}$ .

La relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  ha sido determinada por numerosos estudios llevados a cabo en ciudades latinoamericanas y del mundo. Como es predecible,

existe diversidad en los valores encontrados, debido a las diferencias geológicas, climatológicas, atmosféricas, y en las fuentes de contaminación, que existen aún dentro de una misma ciudad, y que influyen la distribución de tamaño del material particulado en cada sitio de monitoreo (Rodríguez, 2003). Valores encontrados por varios autores para la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  en diferentes ciudades y países del mundo se presentan en la Tabla 1. Para la ciudad de Bogotá, Larsen asume una relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  representativa de 0.6 (Larsen, 2004).

#### MÉTODOS E INSTRUMENTOS

Se realizaron mediciones simultáneas de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en tres estaciones de monitoreo de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB), con monitores automáticos de atenuación beta (BAM) de dos marcas: METONE-BAM1020 para  $PM_{2.5}$  y DASIBI 7001 para  $PM_{10}$ . Los flujos de los equipos de monitoreo fueron calibrados contra un estándar NIST, utilizado por la RMCAB, para referenciar todos sus equipos BAM. Se realizó también una comparación contra el método gravimétrico de referencia (medición con equipo Hi-Vol  $PM_{10}$ ) de los resultados obtenidos con los equipos BAM, donde se encontraron diferencias del orden de  $\pm 10\%$ , espe-

rables y adecuadas, según lo reportado por McMurry (McMurry, 2000).

En la primera estación, ubicada en el centro-occidente de la ciudad, en la sede del instituto distrital de recreación y deporte – IDR – en la localidad de Barrios Unidos, se monitoreó desde el 15 de octubre de 2004 al 25 de enero de 2005. En la segunda estación, ubicada en el edificio de la empresa Sony Music, en la localidad de Kennedy, al sur de la ciudad, se monitoreó desde el 7 de marzo de 2005 al 18 de abril de 2005. Finalmente, en la tercera estación, ubicada en el edificio de la empresa Intecplast, en la zona industrial de Cazucá, al sur-occidente de la ciudad, se monitoreó entre el 25 de abril de 2005 y el 18 de mayo de 2005. Se obtuvieron datos horarios de concentraciones.

La limitación de tener un solo 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  $PM_{10}/PM_{2.5}$ , que han sido bien documentadas (Watson, 1997; Cohen, 1999), dada la extensión del estudio.

| Lugar                    | Fuente                    | Relación $PM_{2.5}/PM_{10}$  |
|--------------------------|---------------------------|--|
| Ciudad de México, México | Romieu et al., 1997       | 0.50 – 0.70  |
| Santiago, Chile          | Romieu et al., 1997       | Invierno 0.60<br>Verano 0.40   |
| Birmingham, UK           | Harrison et al 1997       | Invierno 0.80<br>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<br>Islas Canarias 0.40<br>Barcelona 0.60<br>Tarragona 0.62 |
| Estados Unidos           | U.S. EPA, 2003            | Este 0.75<br>Centro 0.52<br>Oeste 0.53                                     |
| Sydney, Australia        | Cohen D. 1999             | 0.29 – 0.53  |
| Hong Kong, China         | Ho K. et al., 2003        | 0.53 – 0.78  |

Tabla 1. Relaciones  $PM_{2.5}/PM_{10}$  para diferentes ciudades y países del mundo.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos, en el cual se descartaron valores atípicos y extremos. Posteriormente se organizaron conjuntos de datos, de acuerdo con diferentes condiciones meteorológicas, 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, en horas pico de la mañana (8, 9, 10 AM) y en las demás horas del día. Finalmente, se realizó un análisis de regresión con cada conjunto de datos, junto con un análisis de correlación bivariada.

**RESULTADOS**

La tabla 2 muestra los promedios y desviaciones estándar de los promedios diarios de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  medidos en las tres estaciones.

La variabilidad de los datos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , tomados por separado, está relacionada con la actividad de las fuentes antrópicas, tanto industriales como móviles, así como de la variabilidad meteorológica. La relación entre los parámetros, no obstante, podrá emplearse para evaluar la posibilidad predecir las concentraciones de  $PM_{2.5}$  a partir de los datos existentes de  $PM_{10}$ .

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, si bien en la estación SONY la correlación es más débil que en IDRDR y Cazucá. El coeficiente de Pearson obtenido para las estaciones IDRDR y Cazucá fue mayor a 0.90, mientras

que en SONY fue de apenas 0.65. La covarianza fue positiva en todos los casos. El intervalo de confianza observado en la correlación bivariada nunca fue menor al 95% 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  $PM_{10}$  como variable independiente, y sus resultados se muestran en las figuras 1 a 3 y en la tabla 3. En la estación IDRDR, la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  obtenida con datos horarios fue de 0.45. En la estación SONY, esta relación fue de 0.19 y en la estación Cazucá, fue de 0.70.

La estación IDRDR está localizada en una zona que no tiene influencia cercana de grandes industrias, aunque está cerca a avenidas con mediano flujo vehicular. Es la zona con menos variabilidad horaria de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  entre las 3 estudiadas, lo cual sugiere que la alta concentración tanto de  $PM_{10}$  como de  $PM_{2.5}$  de la zona puede ser debida al transporte de este contaminante de otras zonas de la ciudad, más que a la influencia directa de las avenidas cercanas. Una relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  de 0.45 en esta estación confirma esta hipótesis, pues se esperaría una relación superior a 0.60 bajo la influencia directa de fuentes de combustión (Querol, 2004), o inferior a 0.30 bajo la influencia directa de polvo resuspendido o erosión. El coeficiente de Pearson de 0.900 permite afirmar que es el mismo tipo de fenómeno el responsable del incremento o reducción de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , y que sería posible predecir datos de  $PM_{2.5}$  a partir de datos de  $PM_{10}$  en esta estación.

| Estación | $PM_{10}$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] |                     | $PM_{2.5}$ [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] |                     |
|----------|--|---------------------|---|---------------------|
|          | Promedio                               | Desviación estándar | Promedio                                | 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               |

Tabla 2. Resumen de resultados promedio y desviación estándar para las mediciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en las estaciones estudiadas.

| Estación | $R^2$ regresión lineal | Relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ | Coefficiente de Pearson | Intervalo de Confianza |
|----------|------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|
| IDRD     | 0.810                  | 0.450                       | 0.900                   | 99%                    |
| SONY     | 0.419                  | 0.192                       | 0.647                   | 95%                    |
| Cazucá   | 0.844                  | 0.727                       | 0.919                   | 99%                    |

Tabla 3. Resumen de resultados de correlación, relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  y linealidad para las tres estaciones.

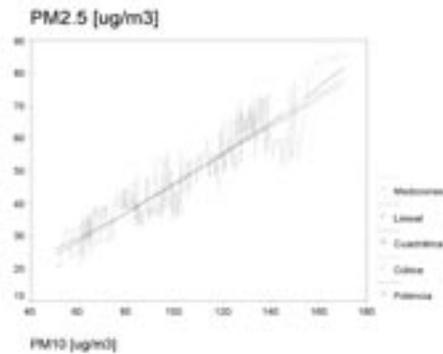


Figura 1. Análisis de regresión datos horarios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la estación IDR entre el 15 de octubre de 2004 y el 25 de enero de 2005.

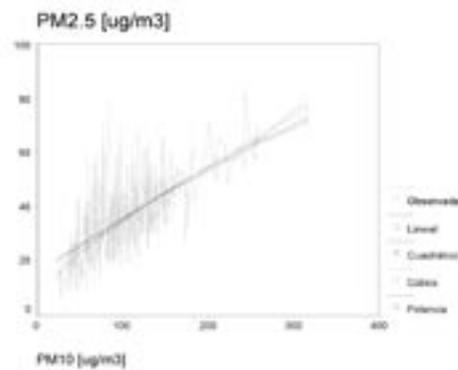


Figura 2. Análisis de regresión datos horarios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la estación Sony entre el 7 de marzo de 2005 y el 18 de abril de 2005

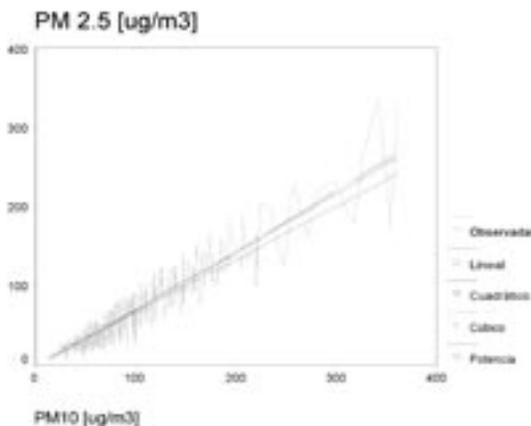


Figura 3. Análisis de regresión datos horarios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la estación Cazucá entre el 25 de abril de 2005 y el 18 de mayo de 2005

La estación SONY está ubicada en una zona principalmente residencial y comercial, con un buen número de vías en regular estado. Las concentraciones de material particulado presentan una alta variabilidad horaria, teniendo un pico en las horas de la mañana, entre 6 y 8 a.m. Este hecho, combinado con la alta contaminación por  $PM_{10}$  y relativamente baja contaminación por  $PM_{2.5}$ , para una relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  de 0.20, puede ser debido a la resuspensión de polvo de las vías en mal estado, provocada por el tráfico vehicular o por acción del viento. 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 y no permite una predicción de datos de  $PM_{2.5}$  a partir de la medición de datos de  $PM_{10}$ .

La estación Cazucá está ubicada en una zona de influencia industrial, principalmente compuesta por pequeñas y medianas empresas, y muy cerca a la autopista Sur de Bogotá. Tiene vías en regular estado y flujo regular de camiones pesados. La variabilidad horaria de las concentraciones de material particulado parece relacionarse con el incremento en la actividad humana, al tener un máximo cercano a la hora pico, como en el caso de la estación SONY. La más alta concentración de  $PM_{2.5}$  entre las 3 estaciones estudiadas, refleja la fuerte influencia de procesos de combustión, que puede provenir tanto de vehículos como de industrias. En contraste, una sorprendente baja concentración de  $PM_{10}$ , comparada con las otras dos estaciones, muestra que no existe una influencia significativa del polvo resuspendido.

La relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  de 0.70 en Cazucá indica también la influencia de las fuentes de combustión sobre las partículas gruesas, generadas mecánicamente (Queiro, 2004). El coeficiente de correlación de Pearson de 0.919, que muestra una alta linealidad, permitiendo predecir las concentraciones de  $PM_{2.5}$  a partir de datos de  $PM_{10}$ . Como en el caso de la estación IDR, sería un mecanismo o fuente común el responsable del aumento o reducción de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

## CONCLUSIONES

1. La linealidad de la relación  $PM_{2.5} / PM_{10}$  en las estaciones IDRD y Cazucá permite utilizar datos de  $PM_{10}$  para predecir con confianza la concentración de  $PM_{2.5}$  a ser utilizada en estudios de relaciones entre este contaminante y la salud de la población en las localidades representadas por estas dos estaciones.
2. Los datos de  $PM_{2.5}$  no son predecibles a partir de datos de  $PM_{10}$  en la estación Sony. Sería necesario monitorear  $PM_{2.5}$  de manera permanente y estudiar con detalle las interacciones entre las fuentes y las variables meteorológicas alrededor de esta estación.
3. Las diferencias de la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  entre las estaciones (SONY está alrededor de 0.2, en IDRD es cercana a 0.45, y en Cazucá está alrededor de 0.7) son causadas muy probablemente por la diferencia entre las fuentes de contaminantes en las zonas monitoreadas.

## RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO

1. Es necesario continuar con el monitoreo alrededor de la ciudad para tener un mapa completo de la distribución espacial de la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$ .
2. Deben efectuarse otros análisis estadísticos que conduzcan a determinar con mayor certeza la influencia de factores meteorológicos y de actividad humana en la relación  $PM_{10}/PM_{2.5}$ .
3. Es necesario determinar la contribución de las diversas fuentes al material particulado en cada zona por medio de la caracterización química del material particulado del aire y su aplicación en modelos de balance de masas o similares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, Australia..
- D'innocenzio F., Difilippo P., L Lepore et al., 1998.  
 "PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations in Urban Air and Size Fraction Distribution of Toxic Metals".  
*Annali di Chimica. No. 88, Paginas 281-289.*
- Green, L. C. 2002.  
 "What's Wrong with the National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) for Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>)?"  
*Regulatory Toxicology and Pharmacology 35, pp. 327-337.*
- 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, pp. 85-101.*
- Harrison R., 1997.  
 "Deacon A. Sources and Processes Affecting Concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Particulate Matter in Birmingham (UK)".  
*Atmospheric Environment 31, pp. 4103-4117.*
- K. Ho. 2003.  
 "Characterization of chemical species in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> aerosols in Hong Kong".  
*Atmospheric Environment 37, pp. 31-39.*
- Janssen N., et al., 1997.  
 "Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations".  
*Atmospheric Environment. 31. Páginas 1173-1184.*
- Kainka E., Kramer G., Dudzevicius J. 1997.  
 "Characterization of particulate matter PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in North Rhine Westphalia, Saxony and Lithuania - first results".  
*In: Inhaled Particles VIII: Proceedings of an International Symposium on Inhaled Particles organized by the British Occupational Hygiene. Annals of Occupational Hygiene. pp. 54-59*
- Larsen, B. 2004.  
*Environmental Damage Cost. A Study of Colombia.*  
 Trabajo pendiente de publicación.

McMurry, P. 2000.

*A review of atmospheric aerosol measurements. Atmospheric Environment 34. 1959-1999 .*

Romieu I., Borja-Aburto V. 1997.

*Particulate air pollution and daily mortality: Can results be generalized to Latin American countries?. Salud Pública en México: 39, pp. 403-411.*

Rodríguez V. , del Mar M. 2003.

*Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Politécnico de Cataluña.*

Querol X., Alastuey A., Ruiza C.R., Artiñano B., Hansson H.C., Harrison R.M., Buringh E., ten Brink H.M., Lutz M., Bruckmann P. Straehli P., Schneider J. 2004.

*“Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in selected European cities”. Atmospheric Environment 38, pp. 6547–6555*

WHO, 2000.

*Air quality Guidelines. World Health Organization.*

Watson J., Chow J. 1997

*“Analysis of historical PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> measurements in Central California. Draft report. Desert Research Institute, Reno, NV”. Prepared for California Regional Particulate Air Quality Study, California Air Resources Board, Sacramento, CA.*

## BIBLIOGRAFÍA

Chow J. and Egami R. 1997,

*“San Joaquin Valley Integrated Monitoring Study: Documentation, evaluation, and descriptive analysis of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, and precursor gas measurements” Technical Support Studies No. 4 and No. 8 - Final report. Desert Research Institute, Reno, NV. Prepared for California Regional Particulate Air Quality Study, California Air Resources Board, Sacramento, CA.*

Harrison R, Deacon A. 1997.

*“Sources and Processes Affecting Concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> Particulate Matter in Birmingham (UK)”. Atmospheric Environment 31, pp. 4103-4117.*

U.S. Environmental Protection Agency. 2003.

*“Air Quality Criteria for Particulate Matter”. National Center for Environmental Assessment-RTP Office. Office of Research and Development. Vol 1..*

U.S. Environmental Protection Agency. 1998.

*“Guidance for using continuous monitors in PM<sub>2.5</sub> monitoring networks”. Office of Air Quality Planning and Standards.*