

Determinación de las concentraciones de fondo de material particulado en suspensión en la ciudad de Medellín

*Carlos Alberto Echeverri Londoño**

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto alcanzar un mejor entendimiento de las concentraciones de fondo del material particulado en suspensión *PST* en la ciudad de Medellín, de tal manera que puedan llegar a proponerse acciones claras sobre los programas de vigilancia y control de la contaminación del aire existentes en la ciudad de Medellín.

Los metales analizados en el material particulado recolectado fueron: calcio, cromo, cobre, hierro, magnesio, manganeso, níquel y plomo. Los metales cromo y níquel no fueron detectables en ninguna de las estaciones y el plomo se detectó solamente en algunas de ellas. Se observa que todos los metales tienen alta dispersión, excepto el hierro total en La América y el magnesio en el punto 2 de Belencito, lo que demuestra la alta variabilidad temporal de los metales en estos puntos. También se observa que los metales no tienen una variación homogénea en su fracción respirable (encontrados en las *PM-10*) con respecto a los metales totales (encontrados en las *PST*), lo que da indicio de la contribución de diferentes fuentes a la concentración de metales y en general de *PST* y *PM-10*.

----- *Palabra clave:* concentraciones de fondo; partículas suspendidas totales (*PST*); partículas menores de 10 μm (*PM-10*).

Abstract

The aim of this work is at achieving a better understanding of background concentrations of particulated materials in suspension (*PST*) in Medellín. This will allow certain actions and programs for watching and controlling air pollution in this city.

Metals analyzed in particulated material were: calcium, chromium, copper, iron, magesium, nickel and lead. Chromium and nickel were not detected in any station and lead was detected in one station only. It is observed that all metals have a large dispersion, excepting total iron in La América and magnesium in point 2 at Belencito, which demonstrates the high temporal variability of these metals in these places. Also it is observed that metals do not have a homogenous variation in their breathble fraction (encountered in *PM-10*) in relation to the total metals (encountered in *PST*) which is indication of the different sources contribution to the metals concentration and, in general, of *PST* and *PM-10*.

----- *Key words:* background concentrations, total suspended particles, lesser than 10 μm particles.

* Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín.

1. Introducción

En Colombia, e incluso en el mundo entero, las concentraciones atmosféricas de fondo no han sido lo suficientemente investigadas. Es común encontrar que se suponen, ya sea en la utilización de los modelos de dispersión o para la evaluación del impacto ambiental de una fuente de emisión sobre la calidad del aire. En el caso de la atmósfera de la ciudad de Medellín no se conocen las concentraciones de fondo del material particulado en suspensión, lo cual hace necesarias su determinación y su caracterización.

La suposición de las concentraciones de fondo conduce a una estimación de las concentraciones de contaminantes que puede ser inadecuada, lo cual repercute en una evaluación ambiental errada. Con el fin de obtener datos confiables en la evaluación del impacto ambiental de una fuente de emisión sobre la calidad del aire, se deben considerar necesariamente las concentraciones de fondo.

El desconocimiento de las concentraciones de fondo de material particulado en la ciudad de Medellín lleva a una serie de problemas como:

- El diseño inadecuado de las estrategias de control.
- Evaluación errónea del impacto ambiental de una fuente de emisión sobre la calidad del aire y por consiguiente en la evaluación de los riesgos para la salud humana.

La definición del nivel de fondo para el material particulado permite identificar la concentración base para la utilización de modelos de dispersión, adicionalmente permite ubicar de forma real las metas de control de calidad del aire, en cuanto a emisiones se refiere.

El objetivo central de este estudio fue determinar las concentraciones de fondo y caracterizar el material particulado en suspensión, que presenta la ciudad de Medellín, para así contribuir al entendimiento del problema ambiental a escala regional.

La evaluación del impacto ambiental de una fuente de emisión sobre la calidad del aire debe considerar necesariamente la concentración de fondo, o sea aquella que existe previamente y de manera independiente a la aportada por la fuente estudiada. La concentración de fondo es atribuida a las fuentes naturales y a las artificiales no identificadas. Es común suponer que para partículas en suspensión en una área relativamente limpia la concentración promedio anual de fondo oscile entre 30 y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Una aproximación para estimar las concentraciones de fondo de *PST* es usar un modelo de dispersión. Las incertidumbres de estos modelos incluyen la distribución espacial de las emisiones, los efectos de terrenos complejos, el efecto de velocidades de viento muy bajas, que no pueden ser medidas con sensores de viento normales, y la magnitud de la mezcla vertical bajo condiciones estables. Sin embargo, la práctica más común es usar uno de los varios valores sugeridos por expertos en ausencia de cualquier información al respecto [6].

Entre los modelos más sencillos se encuentra el "modelo proporcional", que es ampliamente usado como herramienta para el control de la contaminación y aunque tiene muchas limitaciones, no deja de suministrar elementos para evaluar el efecto de las fuentes de emisión sobre una área o receptor. El modelo proporcional es un modelo muy simple, probablemente el modelo de contaminación atmosférica más sencillo que puede usarse para hacer predicciones cuantitativas. Son considerables los esfuerzos que se han hecho para desarrollar modelos mucho más complejos, sin embargo, sus funciones son las mismas que las del modelo proporcional, sólo que con mayor detalle y precisión y mayor confianza en el resultado [4].

En su forma más básica, el modelo proporcional asume que la concentración de cualquier contaminante en un punto determinado es igual a su concentración de fondo (background) más alguna función lineal de la emisión total del mis-

mo en el área que influye en la concentración de aquel punto [4].

$$c_i = b + ke \quad (1)$$

En la cual c_i es la concentración de un contaminante específico en el ambiente en el i -ésimo punto, normalmente expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$; b es la “irreducible” concentración de fondo del contaminante en el ambiente para una atmósfera no influenciada por las fuentes de emisión cercanas que influyen en la concentración en el punto i , normalmente expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$; k es un factor de proporcionalidad que tiene en cuenta la meteorología, ubicación de todas las fuentes emisoras con referencia al punto i , y los otros factores que influyen en la interacción fuente-receptor en aquel punto. Sus dimensiones normales son $(\mu\text{g}/\text{m}^3)/(\text{g}/\text{s})$; y e es la emisión total de todas las fuentes de emisión del contaminante dentro del área geográficamente modelada, normalmente una ciudad o una área metropolitana; sus dimensiones normales son g/s .

El método seguido por Barth [10] para relacionar reducciones de emisión con mejoras en la calidad del aire se denomina método regresivo. El método regresivo se basa en primer lugar en calcular el grado de reducción R de las concentraciones ambientales necesario para alcanzar la calidad del aire deseada. R se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$R = 100\% (C_{\text{máxima-norma}})(C_{\text{máxima}} - b) \quad (2)$$

En la cual R es el grado de reducción necesaria, $C_{\text{máxima}}$ es la concentración máxima del contaminante de interés observada en el área durante un determinado período de tiempo y b la concentración de fondo.

Si se desea mejorar la calidad del aire, ésta se debe conocer por medio del registro y seguimiento. Para poder lograr un mejoramiento en la calidad del aire se le debe exigir a las empresas y otros responsables que reduzcan sus emisiones, y esta reducción debe hacerse con base en el aporte de las fuentes antropogénicas a la calidad

del aire y no con base en el aporte total, por lo que se requiere conocer la concentración de fondo con el fin de poder estimar las reducciones requeridas.

2. Concentración de fondo en el ambiente

Para lograr una definición general de la contaminación de fondo sobre diferentes escalas, es necesario una simplificación drástica del complejo transporte de contaminantes atmosféricos dentro de un conjunto de “procesos de contaminación” (antes que regímenes, mecanismos o fenómenos) [11]. La figura 1 muestra un esquema de los procesos de contaminación del aire.

La idea básica de este sistema es la siguiente [11]:

- a. En el sistema a escala de la contaminación de fondo, el receptor está orientado y los procesos de contaminación están definidos como una función de la distancia viento abajo del receptor.
- b. El término contaminación en este contexto significa material particulado, óxidos de azufre y nitrógeno y otras especies comunes de origen antropogénico. Las fuentes naturales contribuyen considerablemente a los niveles de concentración global.
- c. La contaminación de fondo de un proceso de contaminación a una escala mayor está superpuesta al efecto contaminante de un proceso a escala menor. Por ejemplo, la contaminación de fondo continental más el efecto contaminante regional da la contaminación de fondo regional, etc.
- d. Este concepto es válido sólo si el tiempo de residencia de los contaminantes en la atmósfera es bastante grande comparado con el tiempo de transporte real. Si este no es el caso, los efectos de la remoción atmosférica y mecanismos de transformación deben ser considerados adecuadamente cuando la contaminación de fondo es estimada mientras entra a un proceso de contaminación a una escala menor.

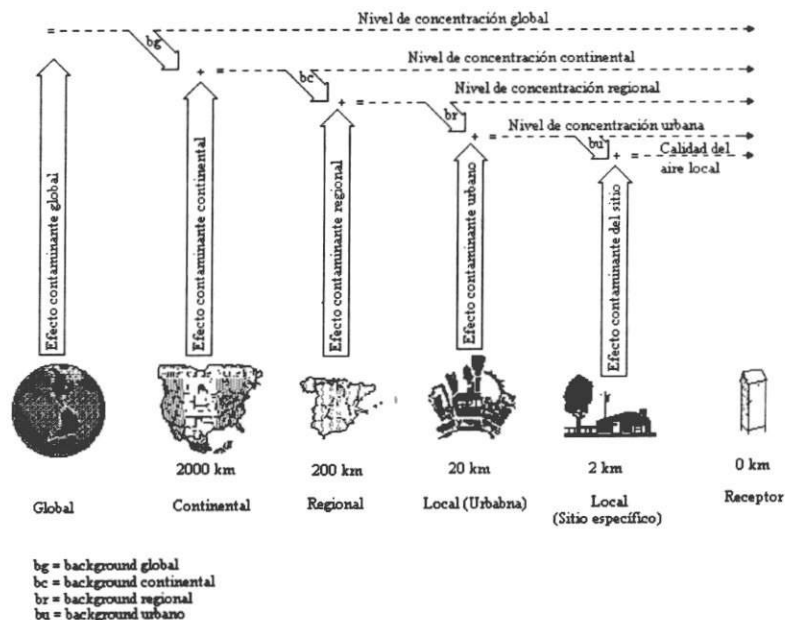


Figura 1 Esquema de la contaminación de fondo

e. Los puntos receptores para la medición de las concentraciones de contaminantes causadas por un proceso de contaminación a una escala dada deben localizarse de tal forma que se asegure que no están afectados por otros procesos (escala menor). Por ejemplo, la concentración de contaminantes al nivel continental puede ser medida en un sitio si los procesos de contaminación a una escala regional, urbana o local no se manifiestan a una distancia de 100 a 200 km alrededor del receptor.

Este sistema de procesos de contaminación del aire ayuda a generalizar el concepto de contaminación de fondo. La contaminación del aire originada desde un proceso de contaminación a una escala mayor alrededor o exterior de un proceso más intenso pero a una escala menor, es llamada contaminación de fondo (background). Las concentraciones de contaminantes originadas por procesos a escala mayor se superponen a los efectos más intensos de los procesos a escala menor. Siguiendo este principio se puede definir la contaminación de fondo global, continental, regional y urbana [11].

La contaminación de fondo se define como el nivel de concentración de contaminación que, cuan-

do es adicionado al aporte de una fuente específica y aportes locales de otras fuentes mayores, puede dar el nivel de concentración de contaminación total. Las concentraciones de fondo se pueden determinar por medición y seguimiento o modelación. Los modelos de simulación se pueden usar para determinar el nivel de concentración en cualquier lugar, para el presente o el futuro, y para un amplio intervalo de condiciones, mientras que la medición y seguimiento se conducen en un número limitado de sitios y los valores medidos son únicamente aquellos que ocurren para las condiciones observadas durante el muestreo [8].

De acuerdo con Larson *et al.* [6], la concentración de fondo no es el nivel de fondo más bajo viento arriba de un área urbana, sino que es una concentración de referencia de una área local que no es directamente atribuible a las emisiones de una fuente cualquiera. La precisión del modelo se puede revisar usando datos de la medición, comparando los niveles de fondo medidos con aquellos predichos por el modelo para condiciones similares [8].

3. Desarrollo experimental

Se realizaron diferentes mediciones con el fin de determinar las concentraciones de fondo de

material particulado y sus variaciones temporal y espacial. Otras mediciones estuvieron encaminadas a caracterizar física y químicamente el material particulado recolectado.

Las estaciones de muestreo fueron seleccionadas de acuerdo con los criterios establecidos por Noll [8] para la determinación de *PST* y otros contaminantes. La selección de los sitios de monitoría y ubicación de los equipos requeridos se hizo teniendo en cuenta los siguientes criterios: densidad demográfica, usos del suelo, dirección del viento, tipos y características de las fuentes más importantes del sector, y los objetivos de la monitoría.

De acuerdo con lo anotado anteriormente, se hizo muestreo en los siguientes sitios de la ciudad de Medellín: Jardín Botánico, Belencito y La América.

3.1. Parámetros seleccionados

En el presente estudio se consideró de importancia la determinación de *PST* y *PM-10*. Las partículas grandes son a menudo de origen natural (no hechas por el hombre) y son creadas por procesos mecánicos tales como la erosión del suelo. Por otro lado las partículas más pequeñas son principalmente de origen antropogénico y son creadas, por ejemplo, en procesos de combustión por condensación y coagulación. Además se analizaron algunos metales en las *PST* y *PM-10* como: calcio, cromo, cobre, hierro, magnesio, manganeso, níquel y plomo con el objeto de caracterizar el material particulado recolectado física y químicamente, y de encontrar diferencias significativas entre la granulometría del material particulado y en la composición química (metales) entre el recolectado en los diferentes sitios de muestreo.

Se estudiaron aquellos elementos que pueden ser considerados como trazadores de fuentes específicas; el cobre y manganeso fueron seleccionados ya que pueden ser emitidos tanto por fuentes naturales como antropogénicas; el plomo es considerado como un indicador confiable de la

actividad humana, particularmente las fuentes móviles. Los elementos hierro, calcio y manganeso usualmente se consideran elementos derivados del suelo.

3.2. Recolección de las muestras

Durante la captación se utilizó un muestreador de alto volumen (Hi-Vol) *PST* y un muestreador de alto volumen *PM-10*, ambos fabricados por la firma Graseby/Andersen. Los equipos operaron bajo flujo variable y fueron previamente calibrados para obtener las curvas de calibración. El período de muestreo fue de veinticuatro horas.

El estudio estuvo comprendido entre el 21 de septiembre de 1998 y el 2 de enero de 1999. La tabla 1 presenta los períodos en que se hizo muestreo por estación.

Tabla 1 Sitios y períodos de muestreo

Sitio	Período
Jardín Botánico	21/09/98 a 26/10/98
Belencito	07/11/98 a 16/11/98
La América	01/11/98 a 02/01/99

Se colectaron un total de 61 muestras de *PST* y 22 de *PM-10*. Las *PST* y *PM-10* fueron determinadas utilizando el método gravimétrico, y los metales por metodologías estándares [1, 13].

4. Análisis de resultados

4.1. Partículas suspendidas totales y respirables

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan las concentraciones de las *PST* y *PM-10*. Para las estaciones Jardín Botánico, Belencito y La América los valores medios geométricos (a condiciones de referencia) para las *PST* durante el período de muestreo son 89, 63 y 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Los valores medios (a condiciones de referencia) para las *PM-10* son de 44 y 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

para el Jardín Botánico y La América, respectivamente.

En Belencito se realizaron mediciones de *PST* en cuatro puntos con el propósito de establecer las interrelaciones espaciales en las concentraciones. Estos puntos estuvieron ubicados a 300 ± 50 metros de distancia el uno del otro.

Tabla 2 Concentraciones de *PST* y *PM-10* en el Jardín Botánico

<i>Fecha</i>	<i>Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	
	<i>PST</i>	<i>PM-10</i>
21-09-98	82	43
22-09-98	68	31
28-09-98	46	25
1-10-98	53	30
5-10-98	102	57
8-10-98	79	43
13-10-98	87	39
15-10-98	89	33
20-10-98	115	66
21-10-98	100	60
22-10-98	121	62
26-10-98	200	
Promedio	89	44

En Belencito las concentraciones de *PST* halladas en el período de muestreo presentan desviaciones mayores del 20% (promedio total 27%), lo que indica la presencia de un régimen de contaminación del aire a microescala superpuesto bajo el régimen a mesoescala.

Aunque un par de puntos de muestreo de la estación Belencito muestran una diferencia estadísticamente significativa (puntos 1 y 4), se puede concluir que no existe diferencia entre las concentraciones medias de *PST* observadas en los cuatro puntos de muestreo. El análisis de correlación entre las *PST* recolectadas en los diferentes puntos de Belencito arrojó que solamente los puntos 2 y 4 no presentan una correlación lineal significativa en un nivel de confianza del 95%.

Tabla 3 Concentración de *PST* en Belencito

<i>Fecha</i>	<i>Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>			
	<i>Punto 1</i>	<i>Punto 2</i>	<i>Punto 3</i>	<i>Punto 4</i>
7-11-98	92	70		81
8-11-98	50	88	70	34
9-11-98	71	51	61	43
10-11-98	63	67	75	48
11-11-98	79	79	82	52
12-11-98	118	110	92	59
13-11-98	149	143	109	71
15-11-98	62	69	41	35
16-11-98	47	10	45	28
Promedio	76	64	69	47

Tabla 4 Concentraciones de *PST* y *PM-10* en La América

<i>Fecha</i>	<i>Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	
	<i>PST</i>	<i>PM-10</i>
1-11-98	58	14
4-11-98	147	69
15-11-98		30
4-12-98	93	
7-12-98	114	
13-12-98	61	26
16-12-98	148	
17-12-98	83	41
19-12-98	89	35
20-12-98	83	
23-12-98	97	36
25-12-98	85	49
28-12-98	113	46
1-01-99	51	22
2-01-99	70	28
Promedio	88	36

4.2 Frecuencia acumulativa lognormal

Los datos de las tablas 2, 3 y 4 se procesaron para obtener la distribución de frecuencia acumulativa lognormal de las concentraciones. Un ejemplo de este tipo de gráficas se muestra en la figura 2, la cual presenta la distribución de frecuencia acumulativa lognormal de las concentraciones de *PST* medidas en el Jardín Botánico.

Cuando una gráfica de probabilidad acumulativa del logaritmo de las concentraciones de un contaminante (en este caso *PST* o *PM-10*) muestra tres segmentos lineales o tendencias (cambio de pendiente) en la curva, se pueden apreciar tres intervalos bien definidos para la concentración de las *PST* o *PM-10*. Según Noll [8], las gráficas de este tipo indican, probablemente, que los datos fueron tomados de diferentes poblaciones, es decir, concentraciones de fondo, concentraciones influenciadas por fuentes antropogénicas locales y la combinación de las dos anteriores. Si prolongamos estos segmentos lineales y sacamos el punto de corte entre las líneas (intersección), podemos obtener los valores extremos para los intervalos de concentración.

Para hacer un análisis de la información que arroja la distribución de frecuencia acumulativa

lognormal de las concentraciones, se puede tomar la figura 2. En ella se aprecia que aproximadamente el 10% de los datos registrados en la estación son concentraciones con alta influencia de fuentes antropogénicas (condiciones de alta contaminación o valores máximos), con concentraciones que están entre 123 y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y que menos del 1% son concentraciones de fondo (valores mínimos) con valores entre 46 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El resto de los datos registra los efectos resultantes de todas las posibles combinaciones entre las fuentes y los fenómenos meteorológicos (valores entre 50 y 123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La tabla 5 presenta los intervalos para la concentración de fondo de *PST* y *PM-10* en los puntos de medición, obtenidos con la distribución de frecuencia acumulativa lognormal de las concentraciones.

Tabla 5 Intervalos para la concentración de fondo de *PST* y *PM-10* en los puntos de medición

<i>Estación</i>	<i>PST</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>PM-10</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Jardín Botánico	46-50	25-30
Belencito	33-51	
La América	58-61	14-17

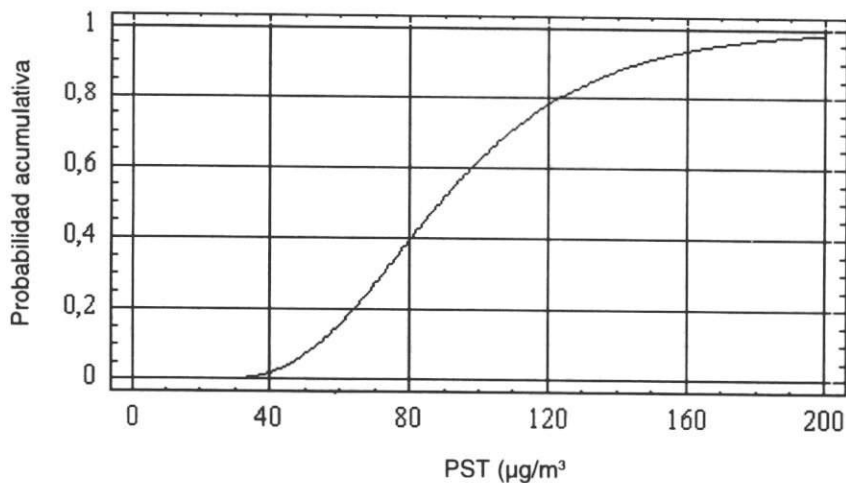


Figura 2 Distribución de frecuencia acumulativa lognormal de las *PST* en el Jardín Botánico

Una medición de la dispersión de los datos es el rango [12, 7]. El rango de un conjunto de datos es simplemente la diferencia entre el valor más grande y el más pequeño. Ya que solamente se utilizan dos de los valores del conjunto de datos de entrada, el rango no es una medida útil. Cuartiles dividen los datos en cuatro partes, cada una contiene el mismo número de valores. La diferencia entre el cuartil superior y el inferior se denomina rango intercuartil. Una variación en el rango que no es sensible a los valores extremos es el rango percentil "10-90", definido como:

$$P_{90} - P_{10} \quad (3)$$

Varios percentiles se usan algunas veces para indicar valores máximos. Por ejemplo, el percentil 99 puede ser usado para datos horarios, mientras que el 90 puede ser apropiado para mediciones diarias [8]. Teniendo en cuenta que una estación de monitoría puede en cualquier momento medir concentraciones de fondo o concentraciones con alta influencia de fuentes específicas, y que las concentraciones de fondo contribuyen solamente en un 10 a 20% a la concentración promedio medible a escala local o regional [11], los percentiles 1 a 10 pueden ser apropiados para indicar los intervalos para la concentración de fondo de *PST* y *PM-10* en diferentes puntos de medición. La tabla 6 presenta los intervalos para la concentración de fondo de *PST* y *PM-10* en los puntos de medición. Estos valores concuerdan bastante bien con los obtenidos a partir de la distribución de frecuencia acumulativa lognormal de las *PST* y *PM-10* en las diferentes estaciones.

Tabla 6 Intervalos para la concentración de fondo de *PST* y *PM-10* en los puntos de medición

Estación	<i>PST</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>PM-10</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Jardín Botánico	46-53	25-30
Belencito	33-57	
La América	51-58	14-22

4.3. Análisis de correlación para el Jardín Botánico y La América

En las figuras 3 y 4 se presenta la correlación entre las *PST* y las *PM-10* en las muestras recolectadas en el Jardín Botánico y La América, respectivamente. Los coeficientes de correlación entre las *PST* y las *PM-10* es de 0,91224 y de 0,91716, respectivamente. El análisis de correlación indica, en ambos casos, que hay una correlación relativamente fuerte entre las variables en un nivel de significancia del 99%. El R^2 indica que las correlaciones establecidas explican el 83,2% y 84,1% de la variabilidad en las *PM-10* en el Jardín Botánico y La América, respectivamente. La relación (*PM-10/PST*) promedio es de 0,52 para el Jardín Botánico y de 0,42 para La América.

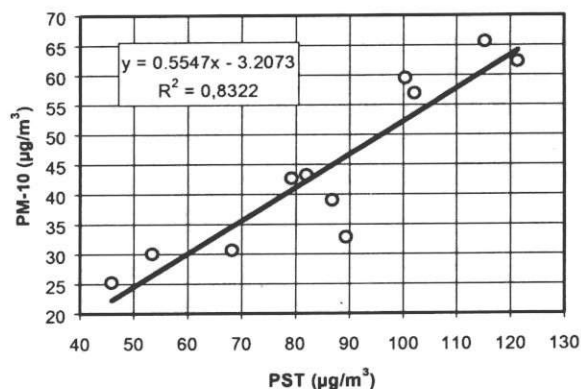


Figura 3 Correlación entre *PST* y *PM-10* en el Jardín Botánico

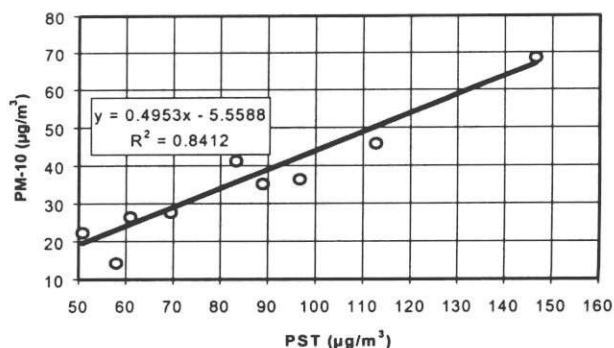


Figura 4 Correlación entre *PST* y *PM-10* en La América

4.4. Análisis de datos de la red calidad del aire de Medellín

En la tabla 7 se presentan las concentraciones de *PST* en diferentes puntos de la ciudad de Medellín, en el período comprendido entre el 6 y el 30 julio de 1998.

Con las pruebas encaminadas a determinar diferencias significativas en los valores medios de *PST* en los diferentes puntos de muestreo, se puede concluir que existen diferencias entre las concentraciones medias de *PST* observadas en el Jardín Botánico, Belencito y La América con las estaciones de muestreo monitoreadas por E.S.E. Metrosalud. La tabla 8 muestra los grupos homogéneos y en ella se puede apreciar lo siguiente:

Tabla 7 Concentraciones de *PST* en diferentes puntos Medellín

Fecha	UPB	Éxito	U. de A.	Politécnico	Mayorista
06-06-98		90	55	94	128
07-06-98		156	55	100	119
09-06-98		93	59	123	129
10-06-98		104	69	92	126
15-06-98	196		70	120	135
16-06-98	131	81	64	123	135
22-06-98	95	101	65	113	124
23-06-98		129			
24-06-98	142		62	202	
28-06-98	114	121	71	113	157
29-06-98	71	67	48	79	101
30-06-98	183	142	105	160	177

Fuente: E.S.E. Metrosalud.

— Las estaciones Universidad de Antioquia (U. de A.) y Belencito presentan los valores más bajos y conforman el primer grupo homogéneo. Esto se debe en gran parte a los valores relativamente bajos que presenta la estación U. de A. para el período en estudio, en comparación a su registro histórico.

— El siguiente grupo homogéneo está conformado por las estaciones seleccionadas para este estudio (Belencito, La América y Jardín Botánico); estaciones que en cierto grado representan bien a las denominadas “estaciones de fondo”. De ellas, los valores más bajos los registra la estación de Belencito y los más altos la estación de Jardín Botánico.

— Las estaciones Éxito, Politécnico, Mayorista y Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) presentan los valores más altos y conforman el último grupo homogéneo; estas estaciones representan muy bien a las estaciones que presentan alta influencia de contaminación por fuentes antropogénicas.

Tabla 8 Grupos Homogéneos (Método de Duncan) entre estaciones

Estación	Grupos homogéneos			
U. de A.	X			
Belencito	X	X		
La América		X	X	
Jardín Botánico		X	X	X
Éxito			X	X
Politécnico				X
Mayorista				X
UPB			X	

En la tabla 9 se presentan los valores de los intervalos para la concentración de fondo de *PST* en diferentes puntos de Medellín. Estos datos fueron obtenidos al procesar los datos (percentiles 1 a 10) de las concentraciones de material particulado obtenidos por REDAIRE y la E.S.E. Metrosalud, para el período comprendido entre junio de 1993 y diciembre de 1997.

Tabla 9 Intervalos para la concentración de fondo de *PST* en diferentes puntos de Medellín

Estación	junio/93 a diciembre/97	julio/98
UPB	51-75	71
U. de A	30-64	48-55
Éxito de San Antonio	54-99	67-74
Politécnico	51-75	79-92

Como se puede apreciar en la tabla 9, los valores de los intervalos para la concentración de fondo de *PST* para el mes de *julio de 1998* se ajustan bastante bien a los valores estimados para el período comprendido entre *junio de 1993* a *diciembre de 1997*, excepto para la estación Politécnico.

Los intervalos para las concentraciones de fondo de las *PST* calculados a partir de la distribución de frecuencia acumulativa lognormal son de: 24 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 27 a $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 45 a $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 43 a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para las estaciones UPB, U. de A., Éxito de San Antonio y Politécnico, respectivamente. Estos valores se ajustan bastante bien a los presentados en la tabla 9, lo que representa otra herramienta importante para determinar las concentraciones de fondo para las *PST*. Para el conjunto formado por todas las anteriores estaciones los valores están entre 24 y $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.5. Análisis de resultados para metales

En la tabla 10 se presentan las concentraciones promedio de metales para Belencito, La América y el Jardín Botánico. En Belencito se registran las concentraciones más bajas de metales y de *PST*, mientras que en La América y el Jardín Botánico no hay una diferencia muy notoria entre las concentraciones de metales, a diferencia de lo que ocurrió con las *PST* y las *PM-10*. Los dos metales encontrados en una concentración promedio relativamente alta son el calcio y el magnesio. El magnesio es aportado a la atmósfera por procesos metalúrgicos y algunas fuentes naturales. El magnesio compone el 2,09% de la corteza terrestre y es el octavo en orden de abundancia. El calcio es aportado por la actividad constructora y del deterioro constante de las vías de la ciudad. El calcio se distribuye ampliamente en la corteza terrestre y es el tercer elemento en abundancia.

Un tercer metal encontrado en una concentración promedio relativamente alta es el hierro cuya principal fuente de emisión es el suelo y que pasa a la atmósfera por el deterioro del piso

Tabla 10 Concentraciones promedio de los metales totales en los sitios de medición

Metal	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	Belencito	La América	Jardín Botánico
Calcio	9,540	10,728	
Cobre	0,033	0,113	0,127
Hierro	0,495	0,939	1,210
Magnesio	3,902	5,924	4,849
Manganeso	0,005	0,018	0,011
Plomo	0,078		

por el flujo vehicular y por la actividad constructora; también es aportado por la actividad metalúrgica [5].

Las concentraciones de metales registradas en este estudio difieren bastante de las reportadas por González [5] y Bedoya [2], que también difieren entre sí. La comparación de los datos obtenidos en el presente trabajo con los reportados por González y Bedoya es muy importante, ya que suministra información sobre la variación temporal y espacial de las concentraciones de metales.

Un análisis comparativo de los datos obtenidos en este estudio con los reportados en otros estudios para Medellín y otras ciudades [2, 5], arroja los siguientes resultados para cada metal:

- a. Calcio. Los valores obtenidos para este metal difieren en forma apreciable con los valores de González y Bedoya para los puntos de medición. Lo anterior puede deberse al alto contenido de calcio presente en el medio filtrante utilizado para este estudio en comparación con el de los otros dos estudios, y a las variaciones espacial y temporal. Sin embargo, González en su estudio, reporta valores promedio que van desde $0,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el Poblado hasta $8,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Sabaneta.
- b. Magnesio. Los valores obtenidos para este metal son muy superiores a los de González y

Bedoya para los mismos puntos o puntos cercanos. La diferencia en los valores se puede explicar a través de las variaciones temporal y espacial, es decir, el período de tiempo que ha transcurrido entre los diferentes estudios y la ubicación de los puntos de muestreo. Si bien es cierto que las estaciones o puntos de muestreo llevan o tienen el mismo nombre, no hay certeza que se hayan realizado en el mismo lugar. Cabe anotar que los valores de magnesio aunque son altos, son valores que fácilmente se pueden encontrar, ya que González en su estudio, reporta valores promedio que van desde $0,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el Sena de Pedregal hasta $5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Bello.

- c. Hierro. Totalmente contrario a lo que sucede con los dos metales anteriores, las concentraciones de hierro halladas en este estudio son mucho más bajas que las reportadas en los otros estudios, que también difieren entre sí. González reporta valores promedio que van desde $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Sabaneta hasta $27,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las Empresas Públicas y Bedoya por su parte, reporta valores promedio que van desde $3,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el Politécnico hasta $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la Universidad Pontificia Bolivariana. Estos autores reportan también en su informe, las concentraciones encontradas en diferentes estudios para varias ciudades, con valores que van desde $0,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Ontario (1974) hasta $31,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Oberhausen (1974).
- d. Otros metales. Se puede decir que el resto de los metales hallados en este estudio presentan algún grado de concordancia con los hallados en los otros estudios, a excepción del cobre que en el estudio de González presenta concentraciones mucho más altas en La América y en la Universidad de Antioquia. González en su estudio, reporta valores promedio para el cobre que van desde $0,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Sabaneta hasta $9,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la Universidad de Antioquia.

Es importante tener en cuenta aquellas concentraciones de metales que se encuentran presen-

tes en el medio filtrante en grandes cantidades, que hacen que su análisis no sea tan confiable como para aquellos metales que están presentes en pequeñas cantidades. Este es el caso del calcio, hierro y magnesio, cuyo contenido en el medio filtrante fue bastante alto tanto en este estudio como en los otros dos.

5. Conclusiones

- Los percentiles 1 a 10 pueden ser una herramienta apropiada para indicar los intervalos para la concentración de fondo de *PST* y *PM-10* en diferentes puntos de medición puesto que una estación de monitoría puede en cualquier momento monitorear concentraciones de fondo o concentraciones con alta influencia de algunas fuentes específicas.
- Las distribuciones de la frecuencia acumulativa lognormal de las concentraciones de *PST* y *PM-10* para el Jardín Botánico, La América y Belencito probablemente indican que los datos fueron tomados de diferentes poblaciones, es decir, concentraciones de fondo y contribución de fuentes de contaminación.
- Los valores de los intervalos para las concentraciones de fondo calculados a partir de la distribución de frecuencia acumulativa lognormal de las concentraciones de *PST* y *PM-10* para el Jardín Botánico, La América y Belencito se ajustan bastante bien a los obtenidos a través de los percentiles 1 y 10, por tanto la distribución de frecuencia acumulativa lognormal representa otra herramienta de gran utilidad para determinar las concentraciones de fondo. Es importante resaltar que las concentraciones de fondo no son valores fijos, ya que ellas también dependen de los efectos resultantes de todas las posibles combinaciones entre las fuentes y los fenómenos meteorológicos.
- El análisis de correlación entre las *PST* y las *PM-10* en las muestras recolectadas en el Jardín Botánico y La América indica, en ambos casos, que hay una correlación relativamente fuerte entre las variables. La relación (*PM-10*/

PST) promedio es de 0,52 para el Jardín Botánico y de 0,42 para La América; esta relación confirma la influencia del parque automotor en el Jardín Botánico, ya que las partículas emitidas por los vehículos se encuentran en la franja de tamaños respirables (menor a 10 μm).

- De las pruebas encaminadas a determinar diferencias significativas en los valores medios de *PST* en los diferentes puntos de muestreo (Jardín Botánico, La América, Belencito y los monitoreados por E.S.E. Metrosalud) se puede concluir que: 1) las estaciones Universidad de Antioquia (U. De A.) y Belencito presentan los valores más bajos, lo que conforma así el primer grupo homogéneo. Esto se debe en gran parte a los valores relativamente bajos que presenta la estación U. De A. para el período en estudio, en comparación a su registro histórico; 2) el siguiente grupo homogéneo es el conformado por las estaciones seleccionadas para este estudio (Belencito, La América y Jardín Botánico); estaciones que en cierto grado representan muy bien a las denominadas "estaciones de fondo". De ellas, los valores más bajos los registra la estación Belencito y los más altos la estación de Jardín Botánico, lo que concuerda con la zonificación y las actividades que se dan en los diferentes sitios y 3) las estaciones Éxito, Politécnico, Mayorista y Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) presentan los valores más altos conformando el último grupo homogéneo; estaciones que representan muy bien las estaciones que presenten alta influencia de fuentes antropogénicas.
- Los valores de los intervalos para la concentración de fondo de *PST* en las estaciones monitoreadas por E.S.E. Metrosalud para el mes de julio de 1998 se ajustan bastante bien a los valores estimados para el período comprendido entre junio de 1993 a diciembre de 1997 en dichas estaciones, excepto para la estación Politécnico. Lo anterior muestra las ventajas y utilidades que tiene la estimación de las concentraciones de fondo a través de los percentiles 1 y 10, que en un período de

muestreo relativamente corto proporcionan una información bastante útil. Sin embargo, los registros históricos de monitoreo dan una información mucho más confiable y representativa que la obtenida a través de este método.

- Los intervalos calculados para las concentraciones de fondo de *PST* a través de la distribución de frecuencia acumulativa lognormal, para los registros históricos de las estaciones UPB, U. de A., Éxito de San Antonio y Politécnico, se ajustan bastante bien a los obtenidos a través de los percentiles 1 y 10. Lo anterior ratifica la distribución de frecuencia acumulativa lognormal como una herramienta valiosa para la determinación de las concentraciones de fondo para las *PST*. Los intervalos para las concentraciones de fondo son 24-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 27-52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 45-85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 43-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para las estaciones UPB, U. de A., Éxito de San Antonio y Politécnico, respectivamente. Para el conjunto formado por todas las anteriores estaciones los valores están entre 24 y 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Las concentraciones de metales registradas en este estudio difieren bastante de las reportadas por González y por Bedoya, que también difieren entre sí. Lo anterior puede ser el resultado de las variaciones temporal y espacial de las concentraciones de los metales presentes en la atmósfera.
- No hay criterios para confirmar cuando un sitio determinado es verdaderamente un sitio de fondo. Ya que cada estación de fondo tiene condiciones climáticas y topográficas únicas, mediciones válidas de los niveles de fondo pueden no ser posibles en cualquier estación 100% del tiempo. Puede esperarse que ciertos períodos de tiempo o para ciertas condiciones climáticas o direcciones del viento, la estación de monitoría de las concentraciones de fondo pueda ser influenciada por fuentes antropogénicas locales o regionales. Solamente el análisis cuidadoso de los datos y la distribución de los valores, combinado con un análisis de las observaciones meteorológicas y otras apropiadas, pueden

definir aquellos períodos de tiempo cuando los datos, de hecho, representan condiciones de fondo de operación.

- La distribución de las *PST* y *PM-10* en la atmósfera de Medellín muestra comportamientos específicos por zonas o estaciones de monitoría. Se encontró la mayor variabilidad de las *PST* en Belencito, aunque también fue el sitio que presentó los valores de concentración más bajos.
- Puede esperarse que para ciertos períodos o para ciertas situaciones climáticas o direcciones del viento, la estación de fondo pueda ser influenciada por fuentes antropogénicas locales o regionales. Solamente el análisis cuidadoso de los datos y la distribución de los valores, combinado con un análisis de las observaciones meteorológicas y otras apropiadas, pueden definir aquellos períodos de tiempo cuando los datos, de hecho, representan condiciones de fondo de operación.

6. Referencias

1. Apha Intersociety Commitee. *Methods of air sampling and analysis*. Washington, D.C. American Public Health Association, 1977.
2. Bedoya Ríos, Álvaro. *Determinación de algunos metales en la atmósfera de Medellín*. Medellín: Ingeominas, 1994.
3. Bedoya V., Julián. Redes de monitoría para calidad del aire. En: Primer encuentro nacional de redes de monitoreo de calidad del aire (1:1995:Medellín). *Memorias primer encuentro nacional de redes de monitoreo de calidad del aire*. Medellín: Redaire, 1995.
4. De Nevers, N. and Morris, J. Roger. Rollback Modeling: Basic and Modified. En: *Journal of the Air Pollution Control Association*. Chicago. Vol. 25, No. 9, pp. 943-947, 1975.
5. González G., J. y Pérez O., J. *Determinación de metales en materiales particulados de la atmósfera del Valle de Aburrá*. Medellín: Universidad de Antioquia, 1985.
6. Larson, T. *et al.* "Local background" levels of carbon monoxide in an urban area. En: *Transportation Research*. Great Britain. Vol. 30, No. 6, pp. 399-413, 1996.
7. Mcbean, E. and Rovers, F. *Statistical Procedures for Analysis of Environmental Monitoring Data & Risk Assessment*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998. Vol. 3.
8. Noll, K and Miller, T. *Air monitoring survey design*. Michigan: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1977.
9. Redaire. *Boletín 5 de la Red de vigilancia de la calidad del aire en los Valles de Aburrá y San Nicolás*. Medellín, 1996.
10. Seinfeld, John. *Contaminación atmosférica: fundamentos físicos y químicos*. España: McGraw-Hill, 1975.
11. Szepesi, D and Fekete, K. Background levels of air and precipitation quality for Europe. En: *Atmospheric Environment*. Great Britain. Vol. 21, No. 7, pp. 1.623-1.630, 1987.
12. Walpole, R. y Myers, R. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Interamericana, 1989.
13. World Meteorological Organization. *International operations handbook for measurement of background atmospheric pollution*. No. 491. Geneva, 1978.