

**CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO EN
LAS PRINCIPALES VÍAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO
COLECTIVO Y MASIVO DEL CENTRO DE BOGOTÁ.**

CRISTHIAN FABIAN RUIZ RAMOS

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C. JULIO DE 2006**

**CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO EN
LAS PRINCIPALES VÍAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO
COLECTIVO Y MASIVO DEL CENTRO DE BOGOTÁ.**

CRISTHIAN FABIAN RUIZ RAMOS

Proyecto de Grado Presentado a la Universidad de los Andes Como Requisito
Parcial de Grado En el Programa de Ingeniería Ambiental

Asesor

NESTOR YESID ROJAS

Ph.D.

Profesor – Asociado

Departamento de Ingeniería Química
Universidad Nacional de Colombia

Co-asesor

EDUARDO BEHRENTZ

Ph.D.

Profesor – Asistente

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad de los Andes

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C. JULIO DE 2006**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a quienes contribuyeron con sus aportes a la realización de este trabajo.

- Néstor Yesid Rojas Ph.D, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, quien con su amplio conocimiento en el tema me orientó en cada instante para lograr los mejores resultados.
- Eduardo Behrentz., Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, quien me brindó la oportunidad de realizar esta interesante investigación.
- Personal administrativo y técnico de City Tv y Covinoc, quienes facilitaron el espacio y demás requerimientos operativos para el correcto funcionamiento del equipo de monitoreo.
- Personal del Laboratorio de Ing. Química de la Universidad Nacional de Colombia.
- Oscar Suárez profesor del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, quien con su amplia experiencia en el análisis de metales por Espectrometria de absorción atómica aportó valiosa información en cuanto a la metodología de análisis.
- A Vilma Palma, quien con sus valiosos aportes logró que esta investigación culminara exitosamente.
- A mis compañeros de trabajo en la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Los Andes, de quienes recibí un constante apoyo y entendimiento a lo largo de la ejecución de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. OBJETIVO GENERAL	6
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3. MARCO TEORICO	8
3.1. CONTAMINANTES CRITERIO.....	9
3.2. NORMAS Y ESTÁNDARES EN EL TEMA DE CALIDAD DEL AIRE.....	11
3.2.1 Normas de la Región de América.....	11
3.2.2 Normas de la Unión Europea.....	18
3.4. EFECTOS DE CONTAMINANTES SOBRE LA SALUD HUMANA.....	19
3.4.1 Efectos del material particulado sobre la salud	19
3.4.2. Efectos de metales pesados sobre la salud.....	22
4. METODOLOGÍA	27
4.1 SISTEMA DE MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO – IMPACTADOR DE CASCADA	29
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE MUESTRO	32
4.2.1 Punto de Muestreo City TV.....	34
4.2.2 Punto de Muestreo Edificio Julio Flórez (EJF).	36
4.3. METODOLOGÍA ANÁLISIS DE METALES EN LOS FILTROS DE AIRE	38
4.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA.	40
5. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS	43
5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL PARTICULADO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO	43
5.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL MATERIAL PARTICULADO EN LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	51
5.3. CONCENTRACIÓN DE PM10 Y PM2.5 EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO DEL DAMA	56
6. DISCUSIÓN EN TORNO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	61
6.1. CONCLUSIONES	76
6.2 SUGERENCIAS Y RECOMENDACIONES.....	79
7. REFERENCIAS	80
ANEXOS	83
ANEXO 1. NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE PARA EL LA UNIÓN EUROPEA	83
ANEXO 2. PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO DE FILTROS DE AIRE	85
ANEXO 3. RESULTADOS EN EL PESAJE DE LOS FILTROS EMPLEADOS EN LOS PUNTOS CITY TV_12 – CITY TV_24 Y EJF_12 – EJF_24	87
ANEXO 4. CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL ESPECTRÓMETRO M-SERIES DE LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL	88
ANEXO 5. RESULTADOS ANÁLISIS DE METALES	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Panorámica de Bogotá D.C., efectos de la contaminación atmosférica	2
Figura 2. Composición en porcentaje del parque automotor en Bogotá D.C.	2
Figura 3. Impacto de la calidad del combustible y del estado de los vehículos en la contaminación atmosférica.	5
Figura 4. Esquema del Sistema Respiratorio Humano	21
Figura 5. Configuración del Impactador de Cascada empleada en el proyecto de Espinosa – 2005	28
Figura 6. Sistema de Medición de Material Particulado – Impactador de Cascada.....	29
Figura 7. Balanza de alta precisión y desecador adecuado para el muestreo de material particulado	31
Figura 8. Esquema de la división de Bogotá por localidades	33
Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo en el centro de Bogotá	34
Figura 10. Panorámica Estación Transmilenio - Museo del Oro.....	35
Figura 11. Sitio de Instalación Impactador – Terraza City TV.....	35
Figura 12. Instalación Impactador de Cascada – Terraza City TV.....	36
Figura 13. Sitio de Instalación Impactador – Terraza Edificio Julio Flórez.....	37
Figura 14. Instalación Impactador de Cascada – Terraza Edificio Julio Flórez	37
Figura 15. Vista general del Espectrómetro M-Series	38
Figura 16. Diagrama de flujo para el análisis de la información de la Secretaría de Transito y Transporte de Bogotá.....	40
Figura 17. Diagrama de flujo para el procesamiento de los datos de las estaciones de Monitoreo del DAMA.....	41
Figura 18. Diagrama de flujo para el cálculo de las concentraciones promedio por mes	42
Figura 19. Procedimiento y parámetros para las pruebas.	43
Figura 20. Concentración por tamaño de partícula – Terraza City TV.....	45
Figura 21. Concentración por tamaño de partícula – Edificio Julio Florez (EJF)	46
Figura 22. Distribución por tamaño de partícula – Terraza City TV	46
Figura 23. Distribución por tamaño de partícula – Edificio Julio Flórez (EJF).....	47
Figura 24. Concentración de partículas en diversas etapas del Impactador en los puntos de muestreo Terraza City TV - EJF	48
Figura 25. Concentración de partículas finas puntos de muestreo.....	49
Figura 26. Concentración por tamaño de partícula - Terraza City Tv equipo Tisch Environmental – 404 (Unal)	51
Figura 27. Fotografía del Espectrómetro M-Series de los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad Nacional	52
Figura 28. Concentración Manganese (Mn)	53
Figura 29. Concentración Cadmio (Cd)	54
Figura 30. Concentración Cobre (Cu)	55
Figura 31. Concentración Cromo (Cr).....	56
Figura 32. Comportamiento del PM 10 en las Estaciones de Monitoreo Sony y Fontibón (2003 - 2004)	57
Figura 33. Promedio diario concentración PM _{2,5} – Estación IDRD	59
Figura 34. Promedio diario concentración PM ₁₀ – Estación IDRD	60
Figura 35. Promedio diario concentración PM ₁₀ – Santo Tomas	60
Figura 36. Comportamiento concentración PM ₁₀ – Estación IDRD.....	61
Figura 37. Composición vehicula intersección – calle 19 con carrera séptima (2004).....	64
Figura 38. Concentración promedio puntos de muestreo terraza City Tv y EJF –	65
Figura 39. Concentración promedio puntos de muestreo terraza City Tv y EJF	67
Figura 40. Esquema de instalación equipo Uniandes en la terraza de City Tv	67
Figura 41. Comparación de la distribución por tamaños de las partículas.....	68
Figura 42. Concentración de metales en PM ₁₀ – Puntos de muestreo	69
Figura 43. Concentración de Manganese de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo	70
Figura 44. Concentración de Cobre de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo.....	72
Figura 45. Concentración de Cromo de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo	73
Figura 46. Concentración de Cadmio de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo.....	74
Figura 47. Distribución de la concentración por tamaño de partícula – Equipo Universidad Nacional	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición del Aire en Porcentaje.....	8
Tabla 2 Normatividad de la calidad del aire y contaminación atmosférica en Colombia	12
Tabla 3. Estándares nacionales de calidad del aire	14
Tabla 4. Normas de calidad del aire para Bogotá.....	14
Tabla 5. Normas de calidad del aire para Chile	15
Tabla 6. Normas de calidad del aire para México	16
Tabla 7. Normas Federales de calidad del aire para Estados Unidos	17
Tabla 8. Normas de calidad del aire para el Estado de California	18
Tabla 9. Normas de calidad del aire para el La Unión Europea.....	19
Tabla 10. Configuración de las etapas del Impactador de Cascada	30
Tabla 11. Parámetros Ambientales medidos. Muestreo en campo de partículas en el aire.....	32
Tabla 12. Parámetros metereológicos zona de muestreo.	33
Tabla 13. Concentración de Material Particulado por Distribución de Tamaño – Equipo Uniandes.....	44
Tabla 14. Resultados muestreo equipo Universidad Nacional - Terraza CiTy TV	50
Tabla 15. Características Estaciones Red de Monitores Calidad del Aire.	56
Tabla 16. Concentraciones PM ₁₀ Estación Sony y Fontibón (2003-2004).	58
Tabla 17. Características Estaciones Red de Monitores Calidad del Aire.	59
Tabla 18. Número de buses sobre la avenida Jiménez para un día viernes de 2004	63
Tabla 19. Número de buses sobre la avenida Jiménez para un día viernes de 2004	64

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

$C\rho$	Calor Específico a presión Constante
Q	Flujo volumétrico de aire
Q_{Std}	Flujo volumétrico de aire a condiciones estándar
P	Presión
V	Volumen
T	Temperatura
PM	Material Particulado
PM ₁₀	Material Particulado inferior a 10 μm
PM _{2.5}	Material Particulado inferior 2.5 a μm
C _{Std}	Concentración a condiciones estándar de PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
C _{real}	Concentración a condiciones reales de PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
ΔW	Diferencia de pesos
t	Tiempo de muestreo
d ₅₀	Diámetro de Corte de la Partícula
CMM	Metros Cúbicos por Minuto
CFH	Pies Cúbicos por Hora
EEA	Espectrometría de absorción atómica
RPM	Revoluciones por Minuto
NO _x	Óxidos de Nitrogeno
SO _x	Óxidos de Azufre
CO	Monóxido de Carbono
DAMA	Departamento Técnico-Administrativo del Medio Ambiente
OSHA	Occupational Safety and Health
IRA	Infecciones Respiratorias Agudas
WHO	World Health Organization

1. INTRODUCCIÓN

Las exigencias del aire en las grandes ciudades del mundo, obedece principalmente a una masiva preocupación por el impacto que tienen los contaminantes atmosféricos sobre la salud de la población. En los últimos años, se ha presentado una elevada emisión de contaminantes a la atmósfera como consecuencia del aumento en la densidad de población y el progreso de la industria, este último muy ligado a la combustión de procesos industriales en general y de vehículos automotores, los cuales traen consigo altas emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), Material Particulado (PM) e hidrocarburos, siendo de principal interés en el estudio de Motores Diesel las emisiones de NO_x y PM.

Bogotá en su calidad de una de las ciudades más grandes de América del sur y por ser la capital de la Republica de Colombia afronta claramente estos problemas (Figura 1). En un estudio reciente contratado por el DAMA (Departamento Administrativo del Medio Ambiente), se concluye que “*la primera prioridad para la comunidad es la reducción de la contaminación del aire*¹”. Este hecho se encuentra estrechamente ligado con que esta contaminación afecta directamente a la población y es fácilmente perceptible en las personas, convirtiéndose en una de las principales causas de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA), que a su vez “*representan una de las más altas causas de morbilidad y mortalidad en niños especialmente*²”.

En la actualidad, Bogotá mantiene y administra una red vial que es utilizada por un porcentaje alto de vehículos particulares. Se estima que el parque automotor está compuesto por 933.669 vehículos, que de acuerdo con un estudio realizado recientemente por la Universidad de los Andes, el 94% corresponde a vehículos livianos a gasolina, el 1% a vehículos livianos Diesel y el 5% restante a buses y vehículos pesados Diesel (Figura 2).

¹ “Jornada sin mi carro en Bogotá”. Red de Calidad del Aire. Alcaldía Mayor de Bogotá. DAMA. Tomado de: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/experien/expcol.htm>. Ultima visita Septiembre 8 de 2005

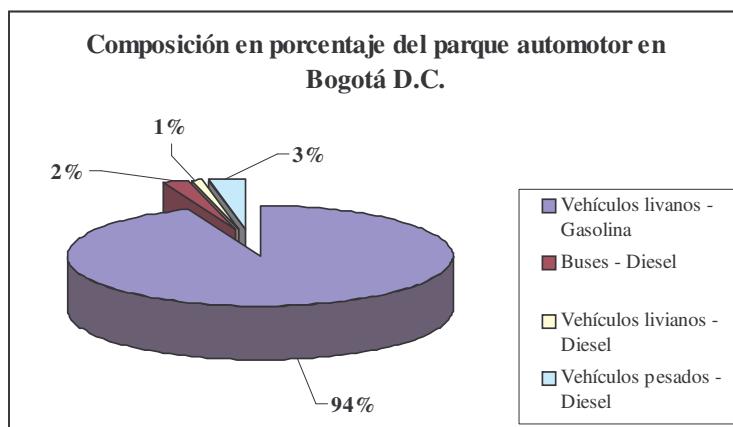
²ROJAS, Néstor Y. Revisión de las Emisiones de material Particulado por la Combustión de Diesel y Biodiesel. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Noviembre de 2004.

Figura 1. Panorámica de Bogotá D.C., efectos de la contaminación atmosférica



*Bogotá D.C, Septiembre 14 de 2005, 8: 30 AM
Fotografía tomada desde la Terraza Edificio de la Contraloría de Bogotá*

Figura 2. Composición en porcentaje del parque automotor en Bogotá D.C.



*Tomado y adaptado de: Proyecto Modelo de Calidad del Aire para Bogotá.
Universidad de los Andes. 2005*

De igual manera, se calcula que el 70%³ de los contaminantes atmosféricos (CO, HC y NOx), provienen de los automotores. Esto, sumado al crecimiento acelerado del parque automotor, el inadecuado mantenimiento y la antigüedad de los vehículos, la calidad de los combustibles, la falta de medios de control de tránsito y el manejo inadecuado de los residuos generados por el sector, constituyen factores sumamente importantes en los elevados índices de contaminación de la ciudad, los cuales se reflejan en enfermedades respiratorias y daños al sistema nervioso, entre otras, principalmente en la población infantil⁴.

Un estudio realizado en la Pontificia Universidad Javeriana, logró soportar el hecho que existe relación de concentración de partículas respirables en el medio local y enfermedades respiratorias en niños menores de 14 años, observando incremento del número de consultas médicas relacionadas con el sistema pulmonar⁵. En el documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social – CONPES (2005), la contaminación del aire es el problema ambiental de mayor preocupación para los colombianos y el generador de los mayores costos sociales después de la contaminación del agua y de los desastres naturales, los cuales han sido estimados en 1,5 billones de pesos anuales, y están relacionados con efectos sobre la salud pública, mortalidad y morbilidad⁶.

En cuanto al tema de calidad del aire en Bogotá, el Dr. Eduardo Behrentz⁷, hace énfasis en el hecho que para Bogotá los niveles de contaminación son relativamente aceptables en términos de CO, NOx y SOx, en cambio, el problema de calidad de aire se encuentra relacionado con smog fotoquímico (Ozono) y Material Particulado. Alude también la importancia del contenido de azufre en el combustible diesel, dado que; “*esta es la variable*

³ JICA. Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 1992. The study on air pollution control plan in Bogotá city area. Bogotá.

⁴ JICA. Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 1992. The study on air pollution control plan in Bogotá city area. Bogotá.

⁵ Solarte, I., 1999. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años. Trabajo de grado, Estudio contratado por el DAMA, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

⁶ CONPES-Departamento Nacional de Planeación Económica y Social., 2005. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire.

⁷ Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Ambiental. Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.

*más importante para la determinación de emisiones de material particulado, uno de los contaminantes de mayor impacto en Bogotá*⁸. Por otra parte, el alto contenido de azufre en el Diesel colombiano imposibilita el uso de tecnologías de control de emisiones, tales como el catalizador de partículas (Figura 3).

Bajo esta óptica, es evidente como los esfuerzos por determinar la contribución de diversas fuentes de contaminación atmosférica, específicamente en cuanto a material particulado, han logrado reducciones importantes en la concentración de partículas en el aire de diversas ciudades del mundo. Uno de los ejemplos más interesantes es el de la Ciudad de Santiago de Chile, que ha reducido de manera significativa las concentraciones de este contaminante, gracias a la aplicación del Modelo CMB (Chemical Mass Balance). Con este modelo se logró determinar de manera certera la contribución de cada una de las fuentes, lo cual le permitió al gobierno Chileno diseñar medidas de control de la contaminación con especial énfasis en fuentes móviles, principalmente buses, logrando en 10 años, pasar de una flota de 14000 buses con 15 años de servicio en promedio, a una flota de 7500 buses con 5 años en promedio de servicio. De igual manera, esta nación logró obtener, en este mismo tiempo, una excelente calidad del combustible Diesel, pasando de un diesel con un contenido de azufre de 5000 ppm a 50 ppm⁹.

Otro caso interesante, es el interés que ha mostrado la comunidad científica hacia la búsqueda de alternativas energéticas que permitan a las naciones contrarrestar los impactos ambientales negativos generados por el uso de vehículos. Tal es el caso, de los estudios realizados tendientes a determinar la aplicabilidad de los ésteres metílicos y etílicos (Biodiesel) como combustibles alternativos en los motores Diesel, argumentando el hecho que las cadenas de ésteres retienen moléculas de oxígeno en su constitución¹⁰, lo cual otorga a este tipo de combustible mejores propiedades en la combustión. Por otra parte, su

⁸ Behrentz Eduardo. Memorias Foro – Taller Internacional de Calidad del aire. Conferencia “Calidad del aire en Bogotá D.C.” Bogotá Junio 5 y 6 de 2006

⁹ Rojas Nestor Y. Memorias Curso Material Particulado: Industria y Transporte. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Bogotá, 2005.

¹⁰ Zhou Pl, Fet AM, Michelsen O. and Fet. K A feasibility study of the use of biodiesel in recreational boats in the United Kingdom.

potencial contaminante, en cuanto a emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, disminuye respecto al ACPM debido a su bajo contenido de azufre y aromáticos¹¹.

Figura 3. Impacto de la calidad del combustible y del estado de los vehículos en la contaminación atmosférica.



*Bogotá D.C, Septiembre 22 de 2005
Fotografía tomada en la vía Bogotá – Villavicencio (Yomasa)*

Es así como, la implementación de políticas ambientales, que promuevan el desarrollo sostenible y la integración de los factores económicos, sociales y culturales en beneficio del medio ambiente y las generaciones futuras, debe ser prioridad para una gran urbe, como lo es la capital de la República. No obstante, éstas deben estar lo suficientemente sustentadas con apropiadas metodologías que traten de obtener cifras y conclusiones lo más acertadas posibles, con el fin de prevenir, controlar y mitigar los impactos ambientales, también deben preservar, administrar y conservar los recursos naturales de la ciudad de una manera racional sin obstaculizar su desarrollo económico y social.

Se pone en evidencia entonces, que las políticas en el tema de calidad del aire a implementar en una ciudad como Bogotá, deben tener un amplio conocimiento del impacto

¹¹ KALAM, M. MASJUKI. H. Biodiesel from Palm oil – an Analysis of its Properties and Potential. University of Malaya. Malaysia 2002

que generan las altas concentraciones de material particulado sobre la salud de la población, donde su principal fuente generadora son las fuentes móviles que operan con tecnología Diesel. Así mismo, estas políticas deben contemplar un análisis en conjunto entre los datos sobre calidad del aire que provén las estaciones de monitoreo del distrito y el reporte de datos y estadísticas sobre Infecciones Respiratorias Agudas (IRA).

Por esto, el presente trabajo pretende brindar elementos de juicio que sustenten la priorización de políticas ambientales y de salud. Éste se concentra entonces, en determinar el aporte de los sistemas de transporte público colectivo y masivo a la contaminación por material particulado, incluyendo un análisis de condiciones metereológicas tales como; velocidad y dirección del viento, precipitación y temperatura entre otros, dado que éstos influyen de manera decisiva en la concentración de los contaminantes. De igual manera se busca reforzar el estudio exploratorio adelantado en la primera fase del proyecto, realizando un análisis de Espectrometría de absorción atómica con horno de grafito, a las muestras recolectadas, determinando la presencia de metales tales como; Plomo (Pb), Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Cobre (Cu) y Cadmio (Cd).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Caracterizar el Material Particulado en dos de las principales vías del transporte público colectivo y masivo del centro de Bogotá, tomando muestras con un Impactador de Cascada, haciendo un análisis de la información de las estaciones de monitoreo del DAMA y realizando un análisis de Espectrometría de absorción atómica (EAA) para determinar la presencia de metales en las muestras recolectadas.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar la metodología experimental para llevar a cabo la recolección de las muestras en el impactador de cascada del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes.
- Medir y comparar la concentración de material particulado entre las vías de transporte colectivo y masivo.
- Determinar y comparar la distribución de tamaños de partículas y la composición química parcial del material particulado.
- Realizar cuatro muestreos en dos puntos del centro de la ciudad, de los cuales dos con un tiempo de medición de 12 horas diarias y los otros dos de 24 horas en una semana cada uno.

Para lograr dar cumplimiento a los objetivos del proyecto, se desarrolló en la primera etapa una revisión bibliográfica de las experiencias en el ámbito tanto nacional como internacional en el tema de calidad del aire, así como de las normas establecidas tanto en Norteamérica, como Suramérica y Europa. Al final de ésta fue posible determinar la metodología tanto del análisis teórico como experimental a emplear, así como los puntos de muestreo.

En la etapa experimental, se determinó el tiempo y modo de muestreo, así como la manera de realizar los análisis de metales por el método de Espectrometría de absorción atómica. Por último se calculó el valor experimental de la concentración de Material Particulado y la presencia de metales en cada una de las muestras. Posteriormente fueron comparadas entre sí, para luego establecer el grado de influencia que tiene tanto el sistema de transporte público colectivo como masivo en la calidad del aire en Bogotá.

3. MARCO TEORICO

Antes de iniciar el análisis detallado, objeto del presente informe, es necesario dar claridad en primera medida acerca del concepto de contaminación atmosférica, así como de otros términos que facilitaran la comprensión del contenido expuesto más adelante. En este sentido, tomando la información consignada en la tabla 1, se entiende entonces por contaminación del aire como cualquier condición atmosférica en que ciertas sustancias alcanzan concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal, lo que puede producir un efecto negativo en las personas, en los animales y en la vegetación. En las grandes urbes, la mayor parte de la contaminación es generada por emisiones del parque automotriz y de las fuentes industriales¹².

Tabla 1. Composición del Aire en Porcentaje.

Gases	Símbolo	Porcentaje
Nitrógeno	N2	78.08
Oxígeno	O2	20.05
Dióxido de Carbono	CO2	0.03
Gases Raros y Otros		0.94

Tomado y modificado de: <http://www.statistics.gov.uk/STATBASE/ssdataset.asp?vlnk=3641>. Última visita Marzo 25 de 2006.

Por otra parte, se hace especial énfasis en que las normas ó estándares de calidad de aire, buscan principalmente determinar los niveles de concentración máxima de contaminantes en el aire, durante un periodo definido, el cual es recomendable no exceder puesto que traería consigo riesgos en la salud humana. Estos estándares son establecidos por organismos gubernamentales competentes en cada uno de los países. En los numerales siguientes se profundizará en este tema.

¹² National Environmental Technology Centre (1998) Air pollutants: by source, 1998: Social Trends 31. <http://www.statistics.gov.uk/STATBASE/ssdataset.asp?vlnk=3641>. Última Visita Agosto 2 de 2005.

3.1. Contaminantes Criterio

Los contaminantes regulados por los Estándares Ambientales Nacionales de Calidad de Aire ó NAAQS por sus siglas en inglés, son denominados contaminantes criterio, debido a que antes de la implementación de estos estándares eran empleados los documentos “Criterio de Calidad de Aire”, los cuales contemplaban los siguientes compuestos¹³: SO₂, CO, NO_x, O₃, PM y Plomo¹⁴.

Monóxido de Carbono (CO)

Es un gas incoloro, inodoro e insípido, ligeramente menos denso que el aire, además es uno de los productos de la combustión incompleta y es emitido casi en su totalidad por fuentes móviles. La hemoglobina mantiene una amplia afinidad con el CO, 200 veces más que por el Oxígeno, lo cual convierte al CO en un compuesto altamente tóxico para la salud humana, puesto que, al combinarse con la hemoglobina en los glóbulos rojos de la sangre forma carboxihemoglobina (COHb) que disminuye la capacidad de la sangre para transportar oxígeno.

Bióxido de azufre (SO₂)

En el tema de emisiones vehiculares, el SO₂ se asocia con la calidad del combustible, puesto que, la presencia de azufre propicia la formación de dióxido de azufre (SO₂) tras el proceso de combustión. Éste es un gas incoloro que en altas concentraciones puede ser detectado por su sabor y por su olor cáustico e irritante. Se disuelve con facilidad en el agua para formar ácido sulfuroso (H₂SO₃), el cual se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico (H₂SO₄) con el oxígeno del aire.

Ozono (O₃)

¹³ NEVERS, Noel. Air Pollution Control Engineering. Second Edition, McGraw Hill. Singapore 2000

¹⁴ En el análisis realizado a las Normas fueron tenidos en cuenta: CO, SO₂, NO_x O₃ y Material Particulado

Es un contaminante secundario formado por una compleja serie de reacciones químicas de los contaminantes primarios o precursores (por ejemplo, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) en presencia de oxígeno atmosférico y luz solar. Los principales efectos a la salud están asociados con el daño que ocasiona a las células en las vías respiratorias causando, entre otros problemas, inflamación y reducción de la capacidad del aparato respiratorio tanto para combatir infecciones como para remover las partículas externas.

Material Particulado (PM)

El Material Particulado consiste principalmente en partículas de carbón no quemado, sulfatos, nitratos, amonio, cloro, y partículas de metales como hierro, mercurio y plomo que al ser emitidas permanecen suspendidas en el aire. Dependiendo del tamaño éstas se clasifican en: PM10, partículas con diámetro por debajo de 10 micras, y PM2.5, partículas con diámetros inferiores a 2.5 micras. Estudios realizados han demostrado que éstas últimas tienen un gran efecto negativo sobre la salud humana, debido a que pueden entrar con facilidad en las vías respiratorias y alterar la actividad alveolar, causando las Infecciones Respiratorias Agudas (IRA).

Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

La combustión de los vehículos operados con motor Diesel producen elevadas emisiones de Óxidos de Nitrógeno, básicamente el óxido nítrico NO, que es producido por la reacción de Nitrógeno y Oxígeno atmosféricos a raíz de las altas temperaturas de la combustión, se enfriá y posteriormente se oxida dando lugar al dióxido de nitrógeno NO₂. El resultado es una concentración de aproximadamente 90% de NO y 10% NO₂ en lo que se conoce como NO_x.

3.2. Normas y estándares en el tema de calidad del aire

La preocupación por el control de la contaminación atmosférica no es algo nuevo para el hombre, existen sucesos que motivan a pensar que años atrás el hombre era consciente del peligro que representa una atmósfera contaminada. En 1832 Carlos VI, en Francia, prohibía en un edicto la emisión de gases malolientes. Así mismo, en Inglaterra ya existía en el siglo XVII una disposición que prohibía encender fuego en las chimeneas durante las sesiones en el Parlamento de Westminster¹⁵. Corresponde en este numeral presentar las ideas fundamentales entorno al estado del arte de la legislación en el tema de calidad de aire en el ámbito nivel nacional e internacional.

En primera medida se presenta una revisión de las normas de algunos países de la región de América Latina (Colombia, Chile y México), posteriormente, se describen brevemente las normas Federales de los Estados Unidos, luego las normas establecidas por la Unión Europea. Finalmente se realiza una comparación entre dichas normas y se plantean las fortalezas y las necesidades del país en este tema.

3.2.1 Normas de la Región de América

Normas en Colombia

Colombia es uno de los países del planeta con mayor grado de biodiversidad, razón por la cual se hace necesaria una regulación que brinde protección al medio ambiente en sus diferentes aspectos. En el caso específico de Calidad del aire y Contaminación Atmosférica la ley 09 de 1979 propone inicialmente la implementación del código Sanitario Nacional, esto ha venido evolucionando y han aparecido nuevas decretos y resoluciones como: Decreto 2 / 82. Aire (emisiones atmosféricas), Decreto 948 / 95. Aire (control de la contaminación atmosférica y protección de la calidad de aire), Decreto 2107 / 95. (Reglamenta la protección y control de la calidad de aire), Resolución 005 / 96. (Niveles

¹⁵ Plan Regional sobre Calidad del Aire Urbano y Salud para el Período 2000 – 2009. Organización Panamericana de la Salud Oficina Sanitaria Panamericana. Washington, DC. 2000

permisibles de emisiones de fuentes móviles a gasolina y diesel) y Resolución 0160 / 96. (Emisiones máximas de fuentes móviles). En la tabla 2 se presenta un resumen de las principales Leyes, Decretos y Resoluciones, que acompañan la evolución normativa del país en cuanto a calidad del aire.

Tabla 2 Normatividad de la calidad del aire y contaminación atmosférica en Colombia

Denominación	Concepto	Cobertura
Ley 09 de 1979	Código Sanitario nacional	Nacional
Ley 30 de 1990	Dicta normas sobre protección de capa de ozono	Nacional
Ley 105 de 1993	Industria del transporte, protección del	Medio Ambiente.
Decreto - Ley 2811 de 1974	Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de protección al medio ambiente Reglamenta lo concerniente al recurso aire, contempla la vigilancia de la calidad del aire y control de las emisiones de las fuentes estacionarias.	Nacional
Decreto 02 de 1982	Prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.	Nacional
Decreto 948 de 1995	Reglamento de protección y control.	Nacional
Decreto 2107 de 1995	Control de calidad del aire.	Nacional- Minambiente
Decreto 1697 de 1997	Regulación de los criterios ambientales de calidad de los combustibles	Nacional- Minambiente
Resolución 898 de 1995	"Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diesel, y se definen los equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones y se adoptan otras disposiciones".	Nacional - Minambiente
Resolución 1208 de 1997 (diciembre 12)	Por medio de la cual se fijan las condiciones de expedición del Certificado de Emisiones por Prueba Dinámica para los importadores que no adquieren los vehículos directamente de la casa matriz o la firma propietaria del diseño.	Nacional - Minambiente
Resolución 1048 de 1999 Ministerio del medio ambiente, ministerio de transporte (diciembre 6)	Por medio de la cual se fijan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diesel, en condición de prueba dinámica, a partir del año modelo 2001.	Nacional - Minambiente
Acuerdo 007 de 1993	Estatuto Metropolitano del Medio Ambiente.	Metropolitano

Tomado y adaptado de: Informe sobre el estado de los recursos naturales y del medio ambiente en Antioquia. Año 2002

Es preciso señalar que para efectos del presente trabajo se tendrá en cuenta las concentraciones atmosféricas máximas permisibles para los contaminantes criterio establecidos en el Decreto 02 de 1982, puesto que los posteriores, fueron modificaciones a este.

El Decreto 948 de 1995, se concentra principalmente en las normas de emisión y en identificar las funciones de las autoridades tanto nacionales como municipales en el tema. El artículo 8o. determina que: *“Las normas de emisión que expida la autoridad ambiental competente contendrán los estándares e índices de emisión legalmente admisibles de contaminantes del aire. Dichos estándares determinarán, según sea el caso, los factores de cantidad, peso, volumen y tiempo necesarios para determinar los valores permisibles”*, mientras que el 68 dice lo siguiente: *“Funciones de los municipios y distritos. c. Establecer las reglas y criterios sobre protección del aire y dispersión de contaminantes que deban tenerse en cuenta en el ordenamiento ambiental del territorio del municipio o distrito, en la zonificación del uso del suelo urbano y rural y en los planes de desarrollo”*.

De otra parte el Decreto 2107 / 95, se concentra en los estándares que deben cumplir los combustibles. Artículo 25: *“Prohibición del uso de crudos pesados. Se prohíbe el uso de crudos pesados con contenidos de azufre superiores a 1.7% en peso, como combustibles en calderas u hornos de establecimientos de carácter comercial, industrial o de servicios, a partir del 1 de enero del año 2001”*. La tabla 3, expone los Estándares Nacionales de calidad del Aire para cada uno de los contaminantes criterio.

Como se mencionó anteriormente, el Decreto 948 de 1995 faculta a los Distritos y a los Municipios para diseñar e implementar mecanismos que le permitan mitigar el impacto de los contaminantes en la atmósfera. Por tal motivo, el DAMA ha determinado unos valores para el aire en Bogotá. Estos se presentan en la tabla 4.

Tabla 3. Estándares nacionales de calidad del aire

Contaminante	Período	Norma	Fuente	Comentarios
PARTÍCULAS, PM ₁₀	Anual	(100 ug/m ³)	Decreto 02 de 1982 Ministerio de Salud	Corresponde al valor máximo del promedio geométrico de los resultados de todas las muestras, diarias recolectadas en forma continua durante 24 horas
	24 h	(400 ug/m ³)	Decreto 02 de 1982 Ministerio de Salud	La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 24 horas que se puede
ÓXIDOS DE AZUFRE, SO ₂	Anual	(100 ug/m ³)	Decreto 02 de 1982 Ministerio de Salud	Corresponde al valor máximo del promedio geométrico de los resultados de todas las muestras, diarias recolectadas en forma continua durante 24 horas
	24 h	(400 ug/m ³)	Decreto 02 de 1982 Ministerio de Salud	La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 24 horas que se puede
ÓXIDOS DE NITRÓGENO, NO _x	Anual	-	Decreto 02 de 1982	Medidos como Dióxido de Nitrógeno NO ₂
	24 h	(100 ug/m ³)	Ministerio de Salud	Medidos como Dióxido de Nitrógeno NO ₂
MONÓXIDO DE CARBONO, CO	1 h	(50 mg/m ³)	Decreto 02 de 1982	Máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 1 hora
	8 h	(15 mg/m ³)	Ministerio de Salud	Máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 8 horas.
OXIDANTES FOTOQUÍMICOS, O ₃		(170 g/m ³)	Decreto 02 de 1982	Corresponde a la máxima concentración de una muestra tomada en forma continua durante 1 hora que se puede sobreasar, por una sola vez en un período de 12 meses.

Tabla 4. Normas de calidad del aire para Bogotá

Contaminante	Periodo	Norma	Fuente	Comentarios
PARTÍCULAS, PM ₁₀	Anual	(55 ug/m ³)	Res.391/01	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
	24 h	(155 ug/m ³)	DAMA	Concentración promedio horaria en 24 horas
ÓXIDOS DE AZUFRE, SO ₂	Anual	34 Ppb	Res.391/01	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
	24 h	141 Ppb	DAMA	Concentración promedio horaria en 24 horas
	3 h	546 Ppb		Concentración promedio horaria en 3 horas

Tabla 4 Normas de calidad del aire para Bogotá (Continuación)

Contaminante	Periodo	Norma	Fuente	Comentarios
ÓXIDOS DE NITRÓGENO, NO _x	Anual	52 Ppb	Res.391/01	Promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días
	24 h	121 Ppb	DAMA	Concentración promedio horaria en 24 horas
	1 h	168 Ppb		Concentración promedio horaria
MONÓXIDO DE CARBONO, CO	8 h	11 Ppb	Res.391/01	Concentración promedio horaria en 8 horas
OXIDANTES	1 h	39 Ppb	DAMA	Concentración promedio horaria
FOTOQUÍMICOS, O ₃	8 h	83 Ppb	Res.391/01	Concentración promedio horaria
		65 Ppb	DAMA	Concentración promedio en 8 horas

Normas en Chile

En Chile la ley 19.300 establece que: “*Es deber del Estado dictar normas para regular la presencia de contaminantes en el medio ambiente, de manera de prevenir que estos puedan significar o representar, por sus niveles, concentraciones y períodos, un riesgo para la salud de las personas*”. En este sentido, el Ministerio Secretaría General de la Presidencia es el organismo encargado de dictar las normas primarias de calidad de aire para cada uno de los contaminantes criterio, con base en los estudios realizados por organismos nacionales e internacionales. La tabla 5 establece los valores estipulados por la normas de calidad vigente.

Tabla 5. Normas de calidad del aire para Chile

Contaminante	Periodo	Norma	Comentarios
ÓXIDOS DE AZUFRE, SO ₂	Anual	31 ppbv (80 ug/m ³ N) 96 ppbv (250 ug/m ³ N).	Promedio aritmético de los valores de concentración trimestral de dióxido de nitrógeno correspondientes a un año calendario.
ÓXIDOS DE NITRÓGENO, NO _x	Anual	53 ppbv (100 ug/m ³ N).	Promedio aritmético de los valores de concentración de dióxido de azufre medidos en una 1 hora.
	1 h	213 ppbv (400 ug/m ³ N).	Promedio aritmético de los valores de concentración de 1 hora de ozono correspondientes a 8 horas sucesivas, promedio móvil.
OXIDANTES FOTOQUÍMICOS, O ₃	8 h	61 ppbv (120 ug/m ³ N).	

De igual manera, en Chile se establecen unos niveles de emergencia ambiental para cada uno de los contaminantes en concentración de una hora. A continuación se presentan los niveles para el Ozono:

Nivel 1: 204 - 407 ppbv (400 - 799 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)

Nivel 2: 408 - 509 ppbv (800 - 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)

Nivel 3: 510 ppbv o superior (1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ o superior)

Normas en México

En México, el Gobierno Federal ha establecido normas para la protección de la salud en materia de contaminantes atmosféricos, con el objeto de proporcionar un margen adecuado de seguridad en la protección a la salud de la población. La tabla 6 expone los valores máximos de esta norma.

Tabla 6. Normas de calidad del aire para México

Contaminante	Límite de exposición aguda		Límite de exposición crónica (Valor medio)	Norma
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable		
O_2	0.11 ppm (1 h)	1 vez cada 3 años	Na	NOM-020-SSA-1993
SO_2	0.13 ppm (24 h)	1 vez al año	0.03 ppm (maa)	NOM-020-SSA-1993
NO_2	0.21 ppm (1 h)	1 vez al año	Na	NOM-020-SSA-1993
CO	11 ppm (8 h)	1 vez al año	Na	NOM-020-SSA-1993
PST	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	1 vez al año	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	NOM-020-SSA-1993
PM_{10}	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	1 vez al año	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 h)	NOM-020-SSA-1993

maa: Media aritmética anual

Tomado y Adaptado de: Segundo Informe Sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas. Instituto Nacional de Investigación en Investigación y Capacitación Amiental – Agencia de Cooperación Internacional del Japón. México 2000.

Normas en los Estados Unidos

Los datos presentados en la tabla 7, corresponden a los publicados por la EPA (NAAQS) para lograr el control de las emisiones que se hacen hacia la atmósfera. Estos estándares están clasificados como estándares primarios y estándares secundarios. Los primarios protegen la salud pública y la salud pública sensible, como niños, enfermos y ancianos; y los secundarios protegen el bienestar público, el daño que se causa a los animales, vegetación y edificios.

De igual manera, en la tabla 8 se consignan los valores permisibles para el Estado de California. Este es un gran estado industrializado, por lo cual se preocupó bastante por su calidad de aire. Estos estándares, al igual que los federales, tratan de controlar las emisiones que se hacen hacia la atmósfera y poder proteger la salud pública y el ambiente de los demás organismos. La institución encargada de esto es la AQMD.

Tabla 7. Normas Federales de calidad del aire para Estados Unidos

Contaminante	Norma	Período
CO	9 ppm (10 mg/m ³)	8 h
	35 ppm (40 mg/m ³)	1 h
NO ₂	0.053 ppm (100 µg/m ³)	Promedio Anual aritmético
PM ₁₀	50 µg/m ³	Promedio Anual aritmético
	150 ug/m ³	24 h
PM _{2.5}	15.0 µg/m ³	Promedio Anual aritmético
	65 ug/m ³	24 h
	0.08 ppm	8 h
O ₃	0.03 ppm	Promedio Anual aritmético
	0.14 ppm	24 h
	0.5 ppm (1300 ug/m ³)	3 h

Tomado y adaptado de: U.S. Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/ebtpages/air.html>. Última visita. Febrero 18 de 2006

Tabla 8. Normas de calidad del aire para el Estado de California

Contaminante	Norma	Periodo
O ₃	0.09 ppm	1 h
CO	9.0 ppm	8 h
	20 ppm	1 h
NO _x	0.25 ppm	1 h
SO _x	0.04 ppm	24 h
	0.25 ppm	1 h
PM ₁₀	30 µg/m ³	Promedio Anual aritmético
	50 µg/m ³	24 hours
PM _{2.5}	20 µg/m ³	Promedio Anual aritmético
	12 µg/m ³	Promedio Anual aritmético
Sulfatos	25 µg/m ³	24 h

Tomado y adaptado de: <http://www.aqmd.gov/smog/AirQualityData.html>. Última visita, Febrero 18 de 2006.

3.2.2 Normas de la Unión Europea

La responsabilidad de la Unión Europea con el ambiente se refleja en el “White Paper on Environmental Liability”. Es la legislación que rige sobre esta comunidad en el ámbito ambiental. Ésta ha sido evaluada por los diferentes países que conforman esta comunidad. Estos estándares crean una responsabilidad en los países y brindan una mejor calidad del aire a sus habitantes. A continuación la tabla 9, presenta un resumen de los datos consignados en el anexo 1.

Tabla 9. Normas de calidad del aire para el La Unión Europea

Contaminante	Norma	Periodo
O_3	110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 h
CO	9.0 ppm	8 h
	20 ppm	24 h
NO_x	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 h
SO_x	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 h

Tomado y adaptado de: http://europa.eu.int/eur-lex/en/lif/reg/en_register_1510.html. Última visita Febrero 18 de 2006.

3.4. Efectos de contaminantes sobre la salud Humana

Como se ha mencionado a lo largo del documento, en la actualidad, los elevados índices de contaminación y las características de altura propias de la ciudad (adversas a los procesos de combustión de los motores) han propiciado un incipiente interés por el estudio del impacto que generan los Motores Diesel en términos de Material Particulado. En este sentido el presente acápite recoge las ideas fundamentales en torno al impacto que tienen sobre la salud humana el conjunto de materia dispersada en la atmósfera y condensada en forma sólida o líquida, cuyos tamaños oscilan entre 0,05 y 500 micras, las cuales están compuestas por una mezcla compleja de productos de naturaleza diversa, dependiendo de su origen¹⁶.

3.4.1 Efectos del material particulado sobre la salud

Las partículas pueden tener un efecto tóxico de una o más de las tres maneras siguientes¹⁷:

¹⁶ Seoánez, Mariano. Tratado de la contaminación atmosférica. España: Mundi-Prensa. 2002.

¹⁷ Wark, K. y Warner, C., 2002. Contaminación del aire: Origen y Control (10a. ed.). México: Limusa.

- La partícula puede ser intrínsecamente tóxica debido a sus características inherentes químicas y/o físicas
- La partícula puede interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio
- Las partículas puede actuar como un conductor a una sustancia tóxica absorbida.

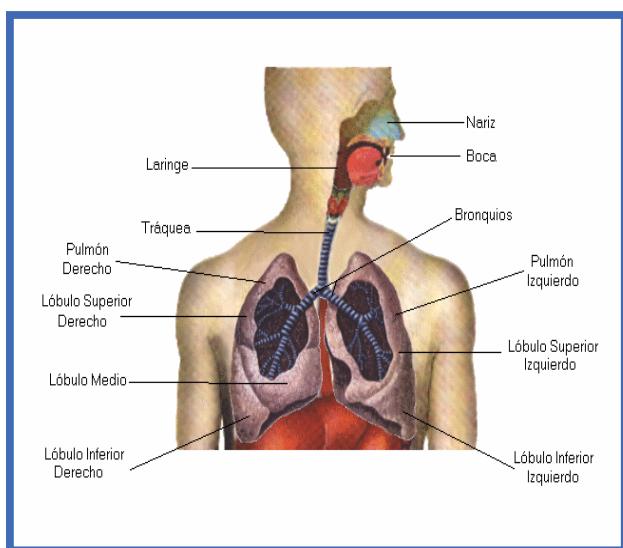
Los factores más importantes para la absorción en el sistema respiratorio de los contaminantes presentes en partículas son su tamaño y solubilidad en agua. El diseño de las vías respiratorias favorece la deposición de partículas en sus paredes. El punto donde se depositan las distintas partículas está determinado fundamentalmente por su tamaño¹⁸. La zona nasofaríngea retiene las partículas de tamaño superior a 10 μm , que se depositan en las distintas zonas ciliada y no ciliada, de la mucosa nasal. Las partículas retenidas en la zona ciliada de la mucosa nasal están sometidas al batido rítmico de los cilios, de forma que alcanzan la faringe en un corto intervalo de tiempo, pasando así al sistema digestivo. Las partículas depositadas en la zona no ciliada de la mucosa nasal permanecen en el lugar de deposición hasta que se eliminan hacia el exterior mediante el estornudo o la limpieza del primer tramo de las fosas nasales.

Las partículas de tamaño inferior a 10 μm penetran en los pulmones. Las de tamaño comprendido en el intervalo 2,5 – 10 μm se depositan en la tráquea, bronquios y bronquiolos (Figura 4), viéndose sometidas de inmediato la aclaración mucociliar hacia la faringe y el sistema digestivo. Partículas de tamaño inferior a 2,5 μm son capaces de llegar al interior de los alvéolos pulmonares, donde las más hidrosolubles se disuelven y las menos se depositan. La eliminación o absorción subsiguiente de estas partículas tiene lugar por fagocitosis o por drenaje hacia el sistema linfático. En el primer caso, los macrófagos pulmonares fagocitan la partícula y pasan al torrente sanguíneo. En el segundo, las partículas penetran los capilares linfáticos, muy permeables a los que pueden acceder partículas y moléculas de peso molecular hasta 10.000 unidades.

¹⁸ Moreno, M., 2003. Toxicología Ambiental: Evaluación del riesgo para la salud humana. McGrawHill.

El sistema respiratorio puede ser dañado directamente por material particulado que entra al sistema sanguíneo o linfático a través de los pulmones. Además, los componentes solubles del material particulado pueden ser transportados a órganos distantes y causar efectos nocivos sobre éstos.

Figura 4. Esquema del Sistema Respiratorio Humano



Tomado y adaptado de: Aerosol Technology. Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles.

Una fuerte correlación ha sido encontrada entre el incremento de la tasa de mortalidad y episodios agudos de contaminación atmosférica. En tales casos, altos niveles de material particulado son acompañados por elevadas concentraciones de SO_2 y otros contaminantes¹⁹. Una posible explicación para este efecto es que el SO_2 llega a ser absorbido sobre la superficie de muy pequeñas partículas y es transportado por las partículas dentro del pulmón. Usualmente, diferentes contaminantes están presentes al tiempo, y, como resultado, los efectos ocurren debido a la acción de más de un contaminante²⁰.

¹⁹ Manahan, S. *Fundamentals of Environmental Chemistry*. New York: Lewis Publishers. 1993.

²⁰ Seinfeld, John. *Air pollution: Physical and chemical Fundamentals*. USA: McGraw Hill. 1975.

Generalmente, se asocian enfermedades del sistema respiratorio con la contaminación atmosférica. Hay dos tipos de reacciones a los contaminantes del aire por el sistema respiratorio. La primera es reacción aguda, tal como la bronquitis irritable y la segunda, las reacciones crónicas, tal como bronquitis crónica y enfisema pulmonar. A continuación una definición sucinta de éstas.

- **Bronquitis.** Se refiere a la condición de inflamación del árbol bronquial
- **Bronquitis crónica.** Es una inflamación sostenida del sistema bronquial, generando incremento en el volumen de secreciones de mucosidad bronquial suficiente para causar la expectoración.
- **Enfisema.** Condición en la cual el alveolo en el pulmón llega a ser desigual y sobredistensionado debido a la destrucción de las paredes alveolares. La destrucción del alveolo es progresiva, resultando en incremento del flujo sanguíneo necesario para lograr transferir el oxígeno y una disminución en la habilidad para eliminar compuestos externos lo cual satura la región alveolar. El enfisema es una de las causas más rápidas de muerte en Estados Unidos.

3.4.2. Efectos de metales pesados sobre la salud

Los metales producen un amplio rango de efectos en humanos resultando de su acción a niveles molecular, celular, de tejidos y órganos. Los metales como elementos son indestructibles y por tanto, tienen el potencial para acumularse en el cuerpo provocando efectos crónicos. La única forma en que pueden ser eliminados del cuerpo es por excreción. La tasa y vías de excreción varían de un metal a otro. Entre los metales de interés asociados al material particulado se encuentran:

Plomo.

La combustión de motores y la utilización de gasolinas con plomo, hace que su concentración en humanos, animales y plantas sea alta en las cercanías de las grandes vías. La intoxicación por plomo se le llama saturnismo²¹. La absorción y distribución de las sales de plomo es diferente, las dos principales vías de contaminación son la aérea y la oral; la vía dérmica es relativamente efectiva como barrera a la entrada del tóxico. Por vía aérea entran en juego varios factores: El tamaño de las partículas, la composición del aire y el tipo de plomo inhalado (carbonato, óxidos, sulfatos, fosfatos). La principal vía de entrada es la respiratoria.

Con respecto a los compuestos orgánicos de plomo como el tetraetil y tetrametil-plomo, son rápidamente metabolizados a compuestos trialquílicos, los cuales son responsables de la toxicidad y posteriormente son lentamente descompuestos a plomo inorgánico. Una vez absorbido el plomo, circula en el organismo unido a los glóbulos rojos. Forma con los fosfatos del plasma, fosfatos coloidales de plomo, los cuales son muy solubles y constituyen el plomo circundante y tóxico. Se deposita en riñones, hígado, piel, glándulas, sistema nervioso y en huesos. Produce lesiones principalmente en el Sistema Nervioso Central, Sistema Nervioso Periférico, el Renal, el Hematopoyético y el gastrointestinal.

Níquel.

Puede estar combinado con otros metales, como hierro, cobre, cromo y zinc para formar aleaciones. Puede estar combinado con otros elementos como cloruros, sulfuros y oxígeno. Es usado principalmente como cubierta metálica, en cerámicas de color, para hacer baterías y como catalizadores que incrementan la tasa de reacción química. Su interés ambiental radica en que pequeñas partículas de níquel en el aire sedimentan en el suelo y se adhieren

²¹ Toronto Public Health. Potential For Occupational and Environmental Exposure to Ten Carcinogens in Toronto. 2002.

principalmente a las partículas que contienen hierro o manganeso o son arrastradas por la lluvia.

Entre las vías de exposición se encuentran: oral, dérmica, respiratoria. Las principales afecciones sobre la salud sobre humanos son las reacciones alérgicas. Altas concentraciones de níquel ingeridas ocasionan dolor de estómago y efectos adversos en sangre y riñones. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) de USA ha determinado que el níquel puede ser posiblemente un carcinógeno y los compuestos de níquel son carcinógeno humanos reconocidos²².

La EPA recomienda que agua para consumo humano no debe contener más de 0,7 mg Ni/L. La Administración sobre Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) para proteger a trabajadores, tiene un límite de 1mg/m³ de aire para níquel metálico y compuestos metálicos en lugares con jornadas laborales de 8 horas, 40 horas/semana.

Cromo.

Es un elemento natural que se encuentra en rocas, animales, plantas, suelo, polvo y gases volcánicos. Las formas más comunes en que se encuentra en el medio ambiente son el cromo (0), el cromo (III) y el cromo (VI). El cromo (III) ocurre en forma natural en el ambiente y es un elemento nutritivo esencial. El cromo (VI) y el cromo (0) son producidos generalmente por procesos industriales. El cromo metálico, que es la forma de cromo (0), se usa para fabricar acero. El cromo (VI) y el cromo (III) se usan en cromado, en tinturas y pigmentos, curtido de cuero y para preservar madera. El cromo entra al aire, el agua, y el suelo principalmente en las formas de cromo (III) y cromo (VI).

En el aire, los compuestos de cromo están presentes principalmente como partículas de polvo finas las que eventualmente se depositan sobre la tierra o el agua. El cromo puede

²² ASTDR-Agency for Toxic Substances and Disease Register. 2003. ToxFAQ's for Niquel. Available on line at: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts5.html>. Última visita Abril 22 de 2005.

adherirse firmemente al suelo y solamente una pequeña cantidad puede disolverse en el agua y así pasar a suelo más profundo y al agua subterránea. El cromo (III) es un elemento nutritivo esencial que ayuda al cuerpo a utilizar azúcar, proteínas y grasa.

Respirar niveles altos de cromo (VI) puede causar irritación de la nariz, nariz que moquea, hemorragias nasales, y úlceras y perforaciones en el tabique nasal. Ingerir grandes cantidades de cromo (VI) puede producir malestar estomacal y úlceras, convulsiones, daño del hígado y el riñón, y puede aun causar la muerte. Contacto de la piel con ciertos compuestos de cromo (VI) puede causar ulceración de la piel.

Varios estudios han demostrado que los compuestos de cromo (VI) pueden aumentar el riesgo de contraer cáncer del pulmón. La Organización Mundial de la Salud (WHO) ha determinado que el cromo (VI) es carcinógeno en seres humanos. El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ha determinado que se sabe que ciertos compuestos de cromo (VI) producen cáncer en seres humanos. La EPA ha determinado que el cromo (VI) en el aire es carcinogénico en seres humanos²³.

Cobre.

Es liberado al ambiente en minas e industrias que usan cobre metálico o sus compuestos, a través de aguas residuales, combustión de combustibles fósiles, producción de fertilizantes y por fuentes naturales. Cuando el cobre es liberado al suelo, puede llegar a unirse fuertemente al material orgánico y otros componentes (arcilla, arena). El cobre arrastrado en el agua como cobre libre o compuestos de cobre, se enlazan muy probablemente a partículas suspendidas en el agua. El cobre es además arrastrado en el aire, su liberación proviene principalmente de procesos de combustión. Las principales vías de exposición son: Oral, respiratoria, dérmica.

²³ ASTDR-Agency for Toxic Substances and Disease Register. 2001. División de toxicología ToxFAQ's. Atlanta, GA. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.

El cobre puede entrar al cuerpo al respirar aire o polvo conteniendo cobre. Puede entrar rápidamente al torrente sanguíneo y ser distribuido a lo largo del cuerpo. Se elimina por orina y principalmente en heces.

Exposición a largo plazo puede irritar nariz, labios y ojos, causar dolor de cabeza, náuseas y diarrea. Ingerir altas cantidades de cobre puede causar daños de hígado y riñón, incluso la muerte. La EPA no lo clasifica como carcinógeno humano por insuficientes casos de estudios.

Zinc.

Es un metal relativamente maleable y tiene fuerte tendencia a reaccionar con compuestos inorgánicos (como óxidos, sulfatos, fosfatos) como también orgánicos. Es un metal esencial para la función de varias enzimas. El compuesto comúnmente usado en la industria es el óxido de zinc. Altas concentraciones de zinc han sido encontradas en próstata, huesos, músculos e hígado. La excreción toma lugar principalmente por la vía del tracto gastrointestinal. El tiempo de vida medio biológico del zinc retenido en humanos es de 1 año. Exposición a altas concentraciones de $ZnCl_2$ atmosférico puede ser fatal, involucrando daño agudo a las membranas mucosas del tracto respiratorio nasofaringeo²⁴.

La exposición a cloruro de zinc puede resultar en severos efectos en el tracto respiratorio, con neumonitis y edema pulmonar fatal. Se especula que la alta toxicidad del $ZnCl_2$ es debido a la formación de ácido clorhídrico.

Manganeso.

Se encuentra como elemento natural en rocas, suelo, agua, alimentos. En humanos y animales es un nutriente esencial que juega un rol en la mineralización de huesos,

²⁴ Friberg L., Nordberg G., Vou V., 1979. Handbook on the Toxicology of Metals. Elsevier/North Holland Biomedical Press. Amsterdam. 1979.

metabolismos de proteínas y energía, protección celular por daño a especies radicales libre entre otros. Aunque es un elemento esencial, la exposición a altos niveles por vía inhalación o ingestión pueden causar efectos adversos sobre la salud como efectos neurológicos causados por bajas o excesivas cantidades de manganeso y tales efectos parecen incrementar su severidad al incrementar los niveles de exposición. Exposición crónica a niveles mucho más bajos de manganeso se ha relacionado con déficit en la habilidad para ejecutar trabajos manuales y pérdidas de coordinación y balance, junto con incremento en síntomas moderados como ansiedad, insomnio. Es desconocido los niveles más bajos a los cuales pueden ocurrir los efectos después de exposición a largo plazo²⁵.

Excesiva exposición por inhalación ha mostrado causar efectos en los pulmones. Incremento en la incidencia de neumonía y bronquitis se ha reportado en poblaciones cercanas a industrias que emiten manganeso. Excesiva absorción en pulmones ha causará acumulación en el cerebro. El manganeso causa una enfermedad irreversible en el cerebro, algo similar a la enfermedad de Parkinson. De acuerdo a la World Health Organization (WHO), efectos adversos en trabajadores expuestos comienzan a aparecer a partir de 0,3 mg/m³.

4. METODOLOGÍA

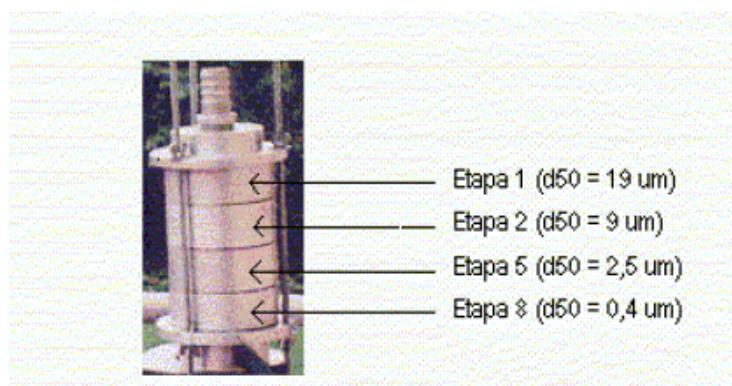
La caracterización del material particulado en vías de transporte público colectivo y masivo en Bogotá, adelantado en la Universidad de Los Andes, inicio en el año 2005 con un proyecto de grado cuyo objetivo era “*Realizar un estudio preliminar sobre la concentración y algunas características químicas del material particulado en dos vías de transporte público masivo y colectivo en Bogotá*”²⁶.

²⁵ ASTDR-Agency for Toxic Substances and Disease Register. 2003. ToxFAQ's for Niquel. Available on line at: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts5.html>. Última visita Abril 22 de 2005.

²⁶ Espinosa, Mónica, Caracterización del Material Particulado en vías de Transporte Público Colectivo y Masivo en Bogotá., Universidad de los Andes, Bogotá 2005.

El dispositivo empleado a lo largo de esta investigación es propiedad del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Los Andes y fue diseñado por Daniel José Beltrán Villegas como parte de su proyecto de grado²⁷. Es preciso señalar que el impactador emplea el principio de captura por medio de chorro de aire a través de orificios de tamaño variable, y de recolección por medio de papel de filtro. Una ventaja de este dispositivo es que permite hacer una separación de las partículas según su diámetro aerodinámico, sin alterar su composición química ni realizar ningún tipo de manipulación del material recolectado, por lo que se evita la alteración de sus características. La figura 5 presenta la configuración empleada en el impactador seleccionado, para la realización del mencionado proyecto.

Figura 5. Configuración del Impactador de Cascada empleada en el proyecto de Espinosa – 2005



Tomado y adaptado de: Caracterización del Material Particulado en vías de Transporte Público Colectivo y Masivo en Bogotá. Espinosa (2005)

Es de vital importancia recalcar que este proyecto siempre estuvo encaminado en evaluar las concentraciones de Material Particulado en los dos puntos seleccionados, para luego ser comparadas entre sí. Por esto, en la etapa experimental se realizó un ejercicio de calibración del equipo, específicamente en el flujo, dado que este parámetro de operación es el más

²⁷ Beltrán Daniel, Diseño y Construcción de un equipo para la Determinación de la Distribución de Tamaño de Material Particulado en el Aire por el Método de Impactación. Universidad de Los Andes, Bogotá 2004.

importante por su estrecha relación con el diámetro aerodinámico de las partículas, siendo este último más sensibilidad al flujo que a la temperatura y presión. En este sentido se describen a continuación cada uno de los sistemas que integra la configuración del impactador de cascada.

4.1 Sistema de Medición de Material Particulado – Impactador de Cascada

El equipo empleado (1), está construido totalmente en aluminio (Figura 6), cuenta con una bomba Dosivac modelo DVR de dos etapas (2), la cual garantiza un flujo a través de los orificios. Para lograr verificar la presión de vacío al interior del impactador, se instalan por medio de mangueras dos manómetros (3). Adicionalmente, para garantizar un flujo constante a través del impactador, este sistema posee un rotámetro (4), el cual provee una lectura en pies cúbicos estándar por hora calibrado por el fabricante y de precisión de 5 SCFH. Por último, los filtros empleados en cada una de las mediciones fueron los *Whatman Glass Microfiber Filtres 934-AH Cat. 1820055* de 55 mm de diámetro (5).

Figura 6. Sistema de Medición de Material Particulado – Impactador de Cascada.



Tomado y adaptado de: Diseño y Construcción de un equipo para la Determinación de la Distribución de Tamaño de Material Particulado en el Aire por el Método de Impactación. Beltrán (2004)

De acuerdo a Beltrán, el impactador separa partículas en el aire con los diámetros de corte indicados en la Tabla 10. Es posible apreciar, en esta misma Tabla, el número de agujeros y el diámetro de estos, así como la caída de presión por etapa y el valor del número de Reynolds. El fabricante, una vez construido el impactador, especifico las siguientes condiciones de operación:

Flujo de aire al interior del impactador (Qa): 30 LPM (0,0005 m³/s)
 Temperatura en el ambiente (T): 20°C
 Presión en el ambiente (P): 560 mm Hg (74660,53 Pa)

Tabla 10. Configuración de las etapas del Impactador de Cascada

Etapa	Diámetro de corte (micras)	# Agujeros	Diámetro del agujero (mm)	Reynolds	Caida de presión (Pa)
1	18,95	2	15	1364,67	4,65
2	8,96	3	8	1705,63	25,55
3	8,22	6	6	1136,31	20,18
4	4,04	12	3	11335,69	80,75
5	2,49	16	2	1274,89	230,15
6	2,00	25	1,5	1081,2	297,29
7	0,65	33	0,7	1741,18	3759,81
8	0,41	42	0,5	1725,62	9252,47

Tomado y adaptado de: Diseño y Construcción de un equipo para la Determinación de la Distribución de Tamaño de Material Particulado en el Aire por el Método de Impactación. Beltrán (2004)

Con el fin de lograr una mayor precisión y confiabilidad en las pruebas, fue preciso llevar a cabo un acondicionamiento previo de los filtros antes y después de ser utilizados²⁸. Para esto se preparó un desecador el cual mantuviera la humedad relativa constante de 30% y una temperatura de 20 °C, con una variación máxima de ±5% y 2 °C respectivamente.

La cantidad de material particulado recogido en cada una de los sitios de muestreo es determinado por diferencia de pesos, para esto, como se presenta en la figura 7, se empleó

²⁸ Ver Anexo 3. “Procedimiento de Muestreo de Emisiones por Filtración”.

una balanza de alta precisión ($\pm 0.0001\text{g}$), cumpliendo la recomendaciones exigidas en el protocolo.

Se tiene entonces inicialmente que a partir del flujo de muestreo y los valores de peso y tiempo obtenidos de la prueba, se puede establecer la concentración de PM_{10} como:

$$C = \frac{\Delta W}{Q^* t} \quad (5)$$

Donde:

C = Concentración por peso de PM_{10} (gr/m^3); ΔW = Diferencia de pesos (gr); F = Flujo de muestreo (m^3/s); t = tiempo de muestreo (s).

Figura 7. Balanza de alta precisión y desecador adecuado para el muestreo de material particulado



Los valores de concentración son usualmente reportados para un flujo estándar (Q_{Std}), el cual se calcula a partir de la ecuación (6), donde P_B y T_B hacen referencia a la presión y temperatura de Bogotá. P_{Std} y T_{Std} corresponden a los valores estándar de 1 atm y 20 °C respectivamente.

$$Q_{Std} = Q_{real} \cdot \left(\frac{P_B}{P_{Std}} \right) \cdot \left(\frac{T_{Std}}{T_B} \right) \quad (6)$$

En la tabla 11 se presenta el valor promedio para Bogotá a la fecha de las pruebas, de igual manera se reporta el valor de la presión atmosférica promedio para Bogotá²⁹.

Tabla 11. Parámetros Ambientales medidos. Muestreo en campo de partículas en el aire.

Parámetro	Valor
Presión Atmosférica (kPa)	74.8
Temperatura Ambiente °C	17.2
Humedad Relativa %	49.6

4.2. Características de los puntos de muestro

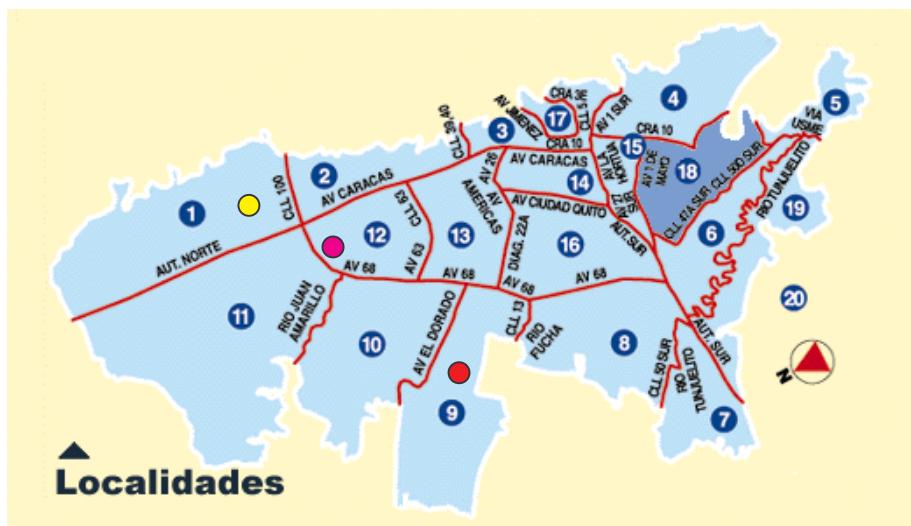
De acuerdo al Estatuto Orgánico de Bogotá, esta ciudad se encuentra dividida en 20 localidades: 1 Usaquén, 2 Chapinero, 3 Santa Fe, 4 San Cristóbal, 5 Usme, 6 Tunjuelito, 7 Bosa, 8 Kennedy, 9 Fontibón, 10 Engativá, 11 Suba, 12 Barrios Unidos, 13 Teusaquillo, 14 Los Mártires, 15 Antonio Nariño, 16 Puente Aranda, 17 La Candelaria, 18 Rafael Uribe, 19 Ciudad Bolívar y 20 Sumapaz. (Figura 8).

Para la etapa de muestreo, fue seleccionada la localidad 3 (Santa Fe), la cual tiene un área total de 4.487,74 hectáreas, un área urbana de 662,05 hectáreas (2.29 % del área total de las localidades urbanas) y una población de 107.044 Hab³⁰. Es importante mencionar que la población de la localidad es altamente cambiante en el curso de un día, dada su alta importancia económica por ubicarse en el centro de la ciudad. En cuanto a las condiciones meteorológicas, la tabla 12 presenta algunas de estas.

²⁹ Serrano Rico, Influencia de la Condiciones de Carga de un Motor Diesel en la Generación y morfología de la Partículas de las Emisiones. Universidad de los Andes, Bogotá 2001.

³⁰ Alcaldía Mayor. Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Recorriendo Santa Fe : diagnóstico físico y socioeconómico de las localidades de Bogotá, D.C. Bogotá, 2004.

Figura 8. Esquema de la división de Bogotá por localidades



Tomado y adaptado de: <http://www.misionbogota.gov.co/imagenes>. Última visita Marzo 23 de 2006.

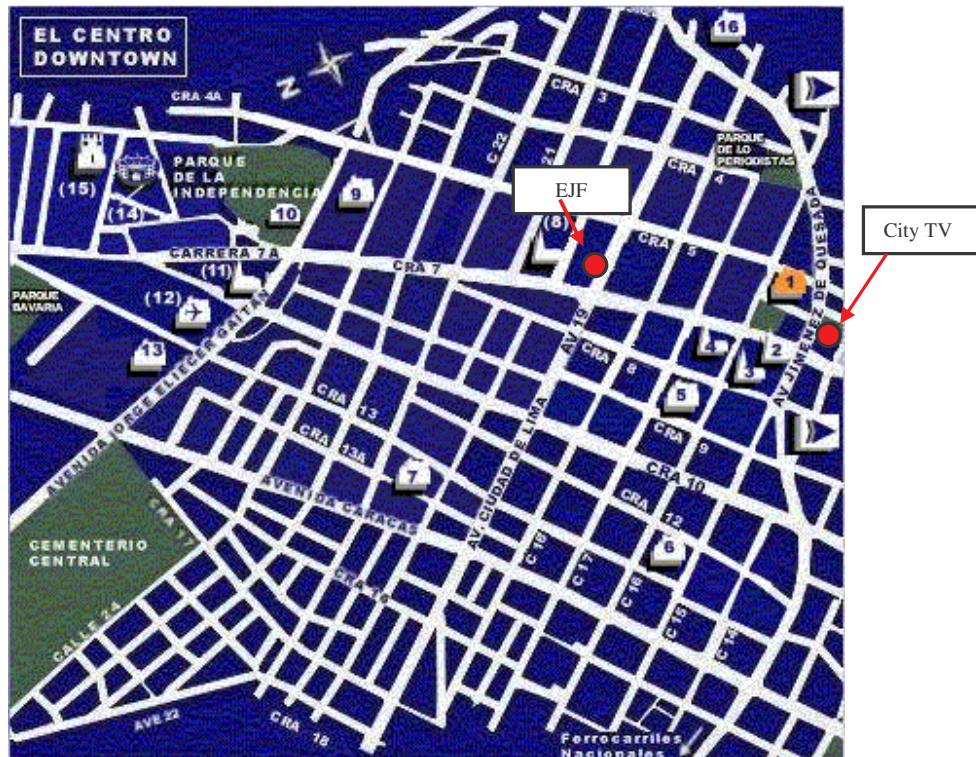
Tabla 12. Parámetros metereológicos zona de muestreo.

Parámetros Metereológicos	Valor
Precipitación media anual	1050 mm anual en el límite oriental 1000 mm anual en el extremo sur occidental
Temperatura promedio	13.1° C
Humedad relativa	73% en los meses secos

Tomado y adaptado de: Agendas Ambientales Locales, Dama.

Los puntos seleccionados se ilustran en la figura 9. Dos de los tres presentados señalados estuvieron a cargo de la Universidad de Los Andes, el punto de la Florida (Carrera séptima con 21) fue administrado por Vilma Palma, estudiante de maestría de la Universidad Nacional. La Florida hace parte de los puntos seleccionados por la estudiante dentro de su tesis de grado “*Distribución de Tamaño de Partículas Respirables en Áreas Afectadas por Tráfico Vehicular*”, por esta razón el presente informe solo contempla el análisis de Espectrometría por Absorción atómica (EAA) para los puntos City TV y para el ubicado en el Edificio Julio Flórez (EJF). Los datos de la Florida se incluyen solo para fines netamente comparativos entre distribución del tamaño de partículas recolectadas.

Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo en el centro de Bogotá



Tomado y adaptado de: <http://www.misionbogota.gov.co/imagenes>. Última visita Marzo 23 de 2006.

4.2.1 Punto de Muestreo City TV.

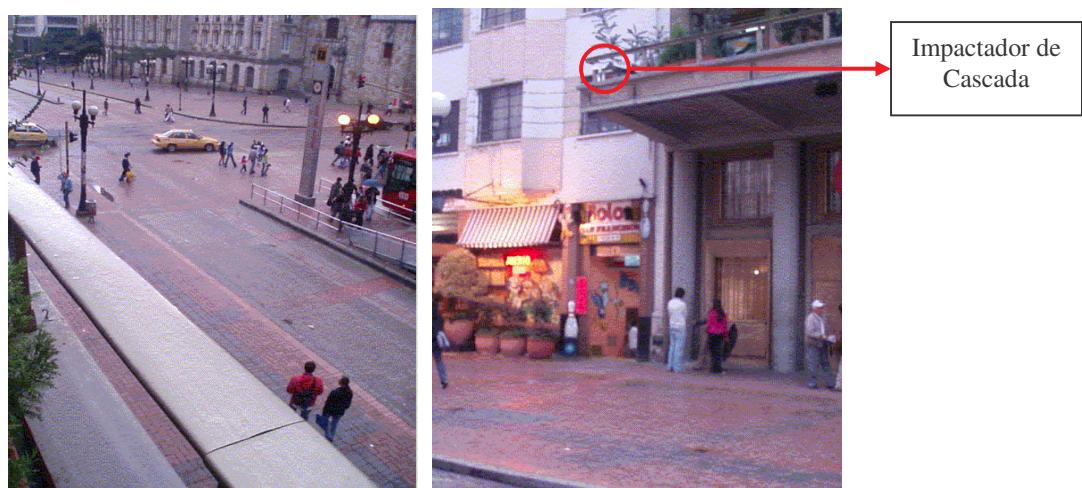
El primer punto fue ubicado sobre la avenida Jiménez a la altura de la Carrera séptima, específicamente sobre la terraza de City TV. Este punto es de especial interés, puesto que allí solo circulan los buses articulados de Transmilenio. (Figura 10). La terraza donde se instaló el equipo, tiene aproximadamente 6.5 m de altura y está alejado 15 m de la intersección con la carrera séptima y 4.5 m de la avenida Jiménez (Figura 11), cabe recalcar que en este punto, el flujo por la carera séptima es, en su gran mayoría, de vehículos livianos con motores a gasolina más no de buses ó camiones con motores diesel, tal y como se verá en el numeral 6.

Figura 10. Panorámica Estación Transmilenio - Museo del Oro.



*Bogotá D.C, Marzo 22 de 2006
Fotografía tomada desde la Terraza de City TV.*

Figura 11. Sitio de Instalación Impactador – Terraza City TV.

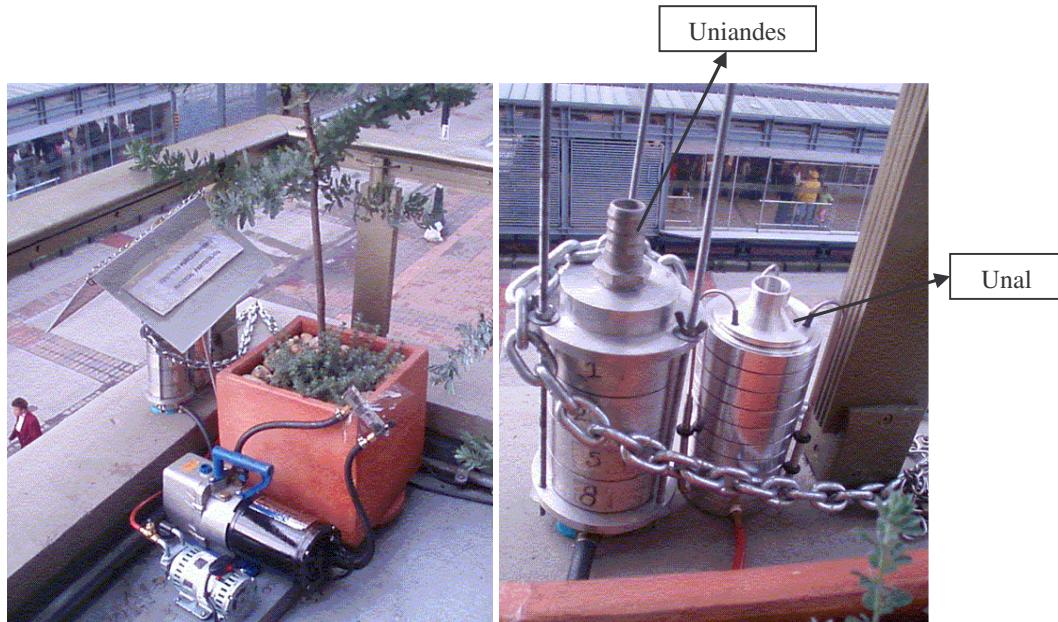


*Bogotá D.C, Marzo 22 de 2006
Fotografía tomada desde la Terraza de City TV.*

La configuración de instalación del equipo se ilustra en la figura 12, los períodos de muestreo abarcaron desde el 15 al 30 de abril de 2006. Se realizaron dos mediciones una para un tiempo de muestreo de 12 horas (City Tv_12) y otro para 24 horas (City TV_24). En el siguiente capítulo se presentan los resultados para cada uno de estos períodos. La medición City Tv_12, se trabajó en conjunto con la Universidad Nacional, por lo cual se

recolectaron las muestras al mismo tiempo, lo cual permitió comparar los resultados entre el equipo de los Andes y un equipo Tisch Environmental – 404, debidamente calibrado y certificado por Tisch Environmental Inc.

Figura 12. Instalación Impactador de Cascada – Terraza City TV.



4.2.2 Punto de Muestreo Edificio Julio Flórez (EJF).

El segundo punto de muestreo se ubicó en la calle 19 No. 6-20, allí se encuentra el edificio Julio Flórez, el cual cuenta con una terraza de las características similares a las de City TV. Es interesante este punto puesto que la calle 19 es una vía del centro con alto tráfico vehicular, en especial de buses, busetas y colectivos operados con tecnología Diesel. El equipo se instaló aproximadamente a 7.2 m de altura y a 20 m de distancia a la carrera séptima y 3.0 m de la calle 19 (Figura 13). En este punto, al igual que en City TV, la carrera séptima no presenta un alto flujo vehicular de buses ni camiones.

Figura 13. Sitio de Instalación Impactador – Terraza Edificio Julio Flórez.



Al igual que el punto City TV, se realizaron dos mediciones, una para un tiempo de operación del equipo de 12 horas y otra de 24 horas, los resultados aparecen consignados en el anexo 4. La figura 14 ilustra la instalación del impactador en este punto.

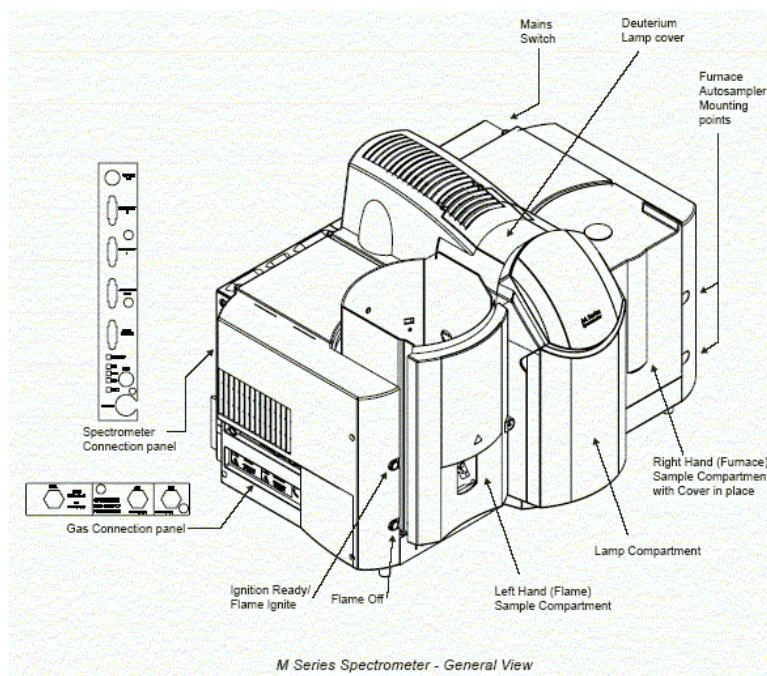
Figura 14. Instalación Impactador de Cascada – Terraza Edificio Julio Flórez



4.3. Metodología Análisis de Metales en los Filtros de Aire

El método escogido para el análisis de metales fue el de espectroscopia de absorción atómica (EAA) por horno de grafito, el cual presenta límites de detección lo suficientemente bajos, para lograr un error bajo en los resultados. El equipo empleado fue el M Series Atomic Absorption Spectrometers (Figura 14), propiedad de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá. Las pruebas fueron realizadas en los laboratorios de Ingeniería Química de esta universidad, bajo la supervisión del Ingeniero Oscar Suárez.

Figura 15. Vista general del Espectrómetro M-Series



Tomado y adaptado de: M Series Atomic Absorption Spectrometers Operators Manual

Dado que la determinación de los metales se debe hacer en muestra analíticas, fue necesario realizar una digestión ácida a los filtros recogidos en las mediciones con el impactador. Para esto, luego del pesaje de los filtros, éstos fueron tratados conforme lo establecen los métodos EPA IO-31 “Selección, preparación y extracción de material filtrado”. Las

extracciones tuvieron lugar en los laboratorios del CITEC de la universidad de Los Andes y se tuvieron presentes las siguientes pasos.

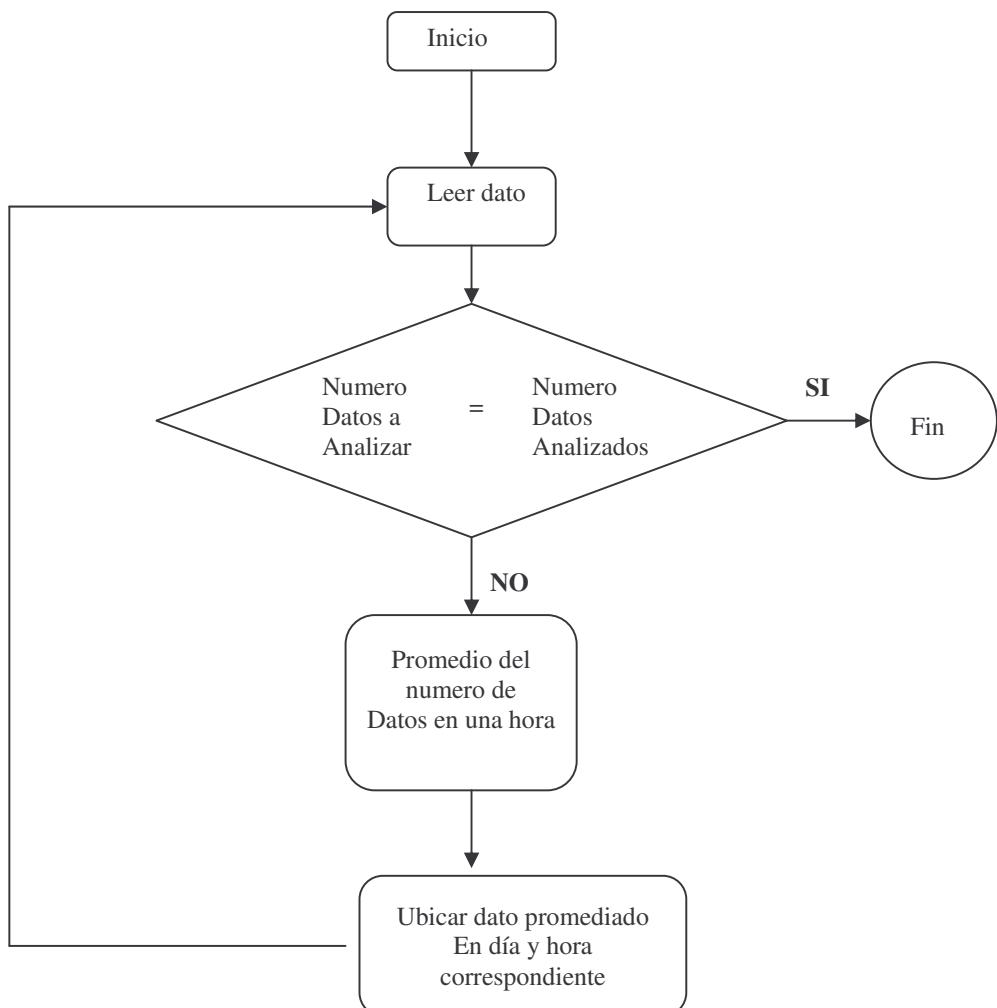
- Debido a que no existe en el laboratorio material exclusivo para la digestión de muestras de aire, se decidió lavar cuidadosamente y con abundante agua y jabón el material a emplear, finalmente fue purgado con agua desionizada.
- Dadas las características de los filtros *Whatman Glass Microfiber Filtres 934-AH Cat. 1820055* y pese a que el método establece tomar una muestra de 2.5 cm. x 20 cm de la parte central del filtro, para este caso, se llevo a cabo la digestión para todo el filtro. Fueron sometidos a este proceso los filtros ubicados en las etapas 5 y 8 (Ver figura 5)
- Para llevar a cabo la digestión, fue necesario transferir la muestra presente en los filtros a vasos de precipitado de 100 ml.
- Posteriormente fueron adicionados 30 mL de solución ácida, la cual esta preparada por 55.5 mL de HCl (fumante 37%)/16.75 mL de HNO₃ (analítico 65%) diluido en un 1 litro de agua desionizada³¹.
- Luego fue puesta la solución en baño maría, por una hora, a una temperatura de ± 90°C), cubriendo el de precipitado. Una vez haya pasado una hora se deja enfriar la digestión a temperatura ambiente. Posteriormente la muestra debe ser filtrada en papel Wathman No 1.
- Por último, se recoge el filtrado en un balón volumétrico de 50 mL, se adicionan 20mL de agua desionizada y se deja en reposo durante 30 minutos, para ser filtrado nuevamente en papel Wathman No 1. Lo filtrado debe ser recogido en un balón volumétrico de 50 mL y completar volumen con agua desionizada.

³¹ Conforme lo realiza el profesor Jorge Pachón en los laboratorios de Ingeniería Ambiental la Universidad de la Salle.

4.4 Procesamiento y análisis de la información recopilada.

El procesamiento y análisis de la información suministrada se llevó a cabo empleando la herramienta computacional Microsoft Office Excel. Para los datos suministrados por la Secretaría de Transito y transporte, fue necesario el diseño de un macro que permitió determinar el número de vehículos que pasan a través de la intersección dada, especificando la hora y el sentido. La figura 16 muestra la lógica seguida para llevar acabo el análisis de los aforos vehiculares del 2004.

Figura 16. Diagrama de flujo para el análisis de la información de la Secretaría de Transito y Transporte de Bogotá



Para procesar los datos provenientes de la estación de monitoreo del DAMA, fue necesario el diseño de una segunda macro que permitió determinar el valor promedio por día y hora para cada mes del año. En esta etapa no fueron tenidas en cuenta las casillas con un valor de cero, es decir, el denominador para calcular el promedio variaba de acuerdo a la cantidad de casillas validas (valores diferentes de cero) para cada hora. Las figuras 17 y 18 muestran la metodología seguida para la implementación del Macro que organiza los datos por series de tiempo y que presentan el promedio de las concentraciones de cada uno de los contaminantes por hora y por día para cada mes.

Figura 17. Diagrama de flujo para el procesamiento de los datos de las estaciones de Monitoreo del DAMA

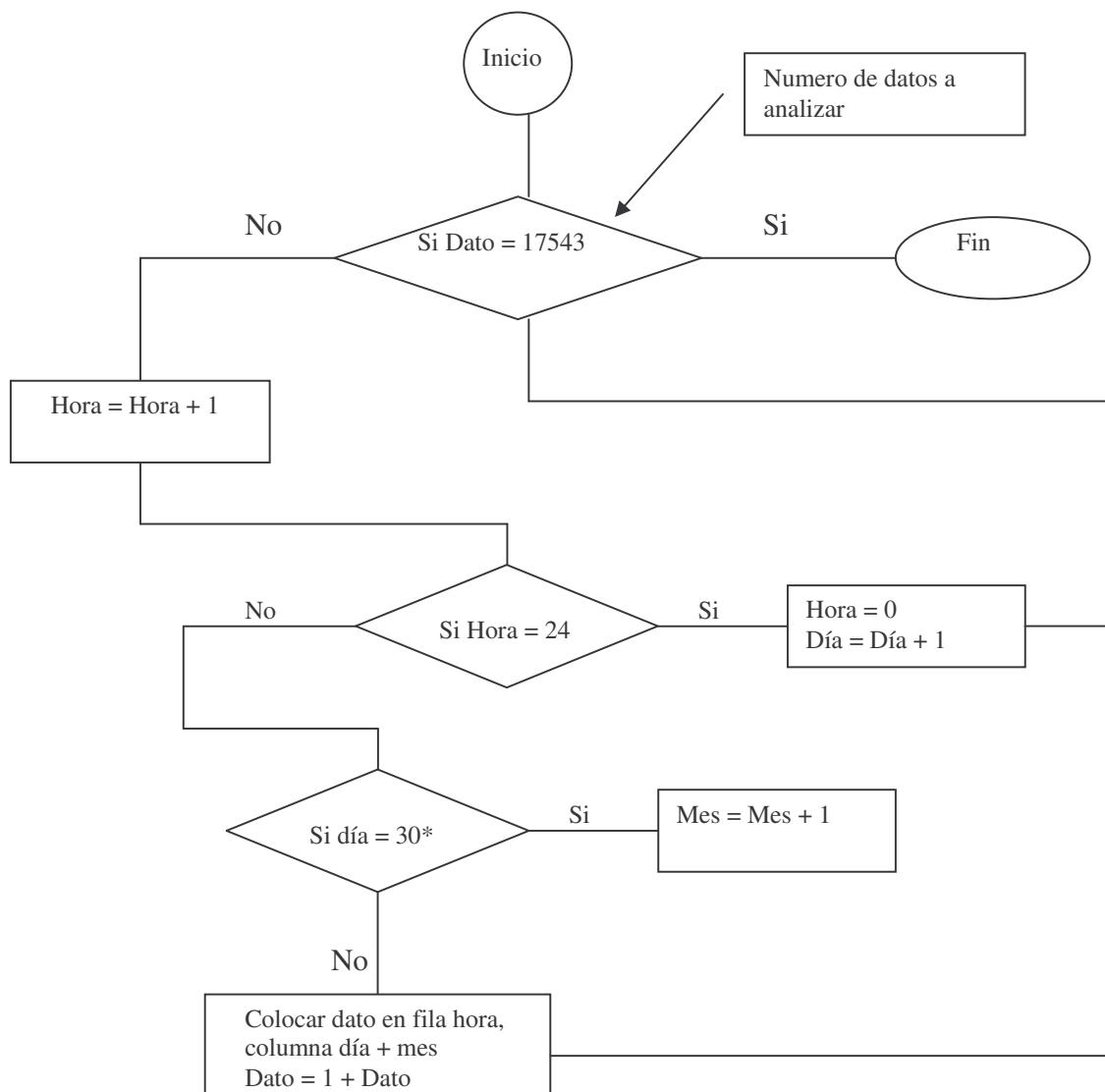
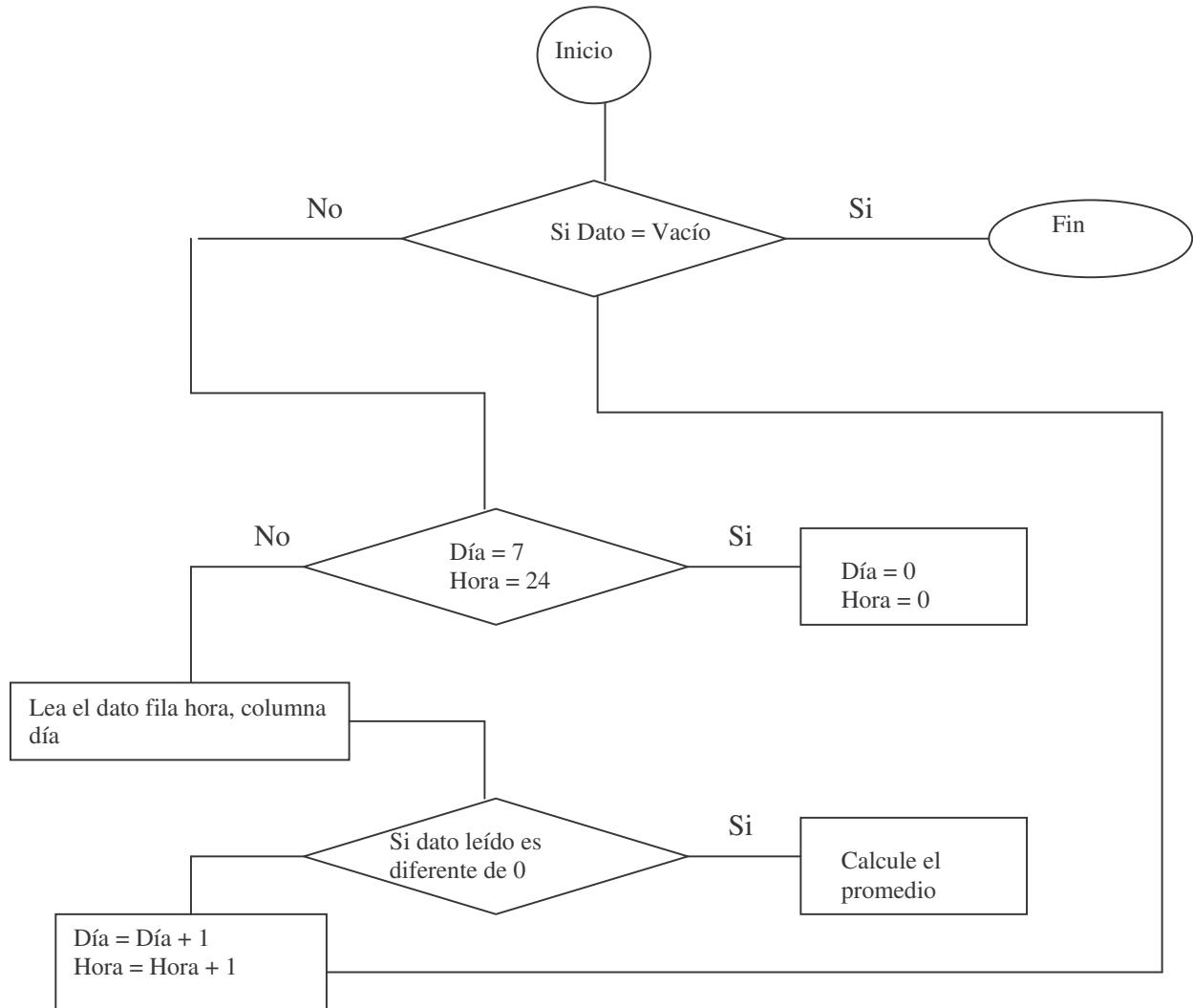


Figura 18. Diagrama de flujo para el cálculo de las concentraciones promedio por mes

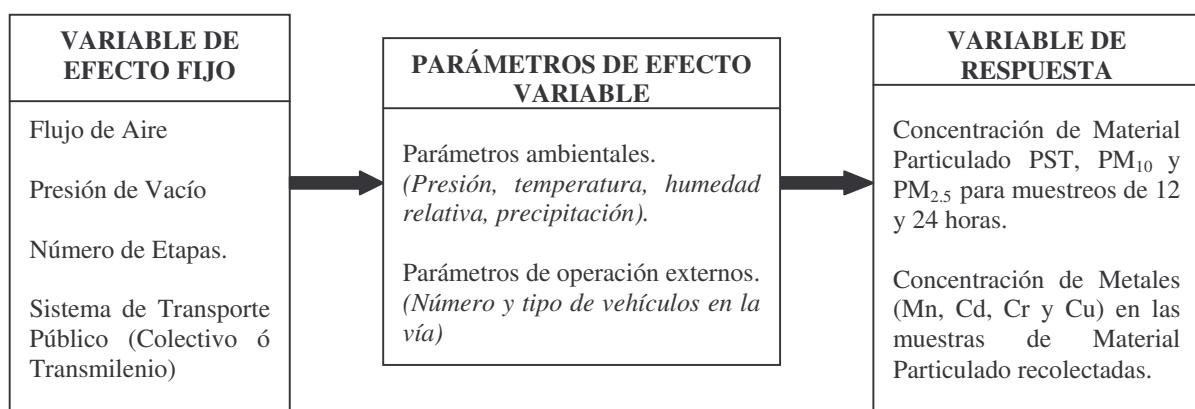


La información consolidada se presenta en el capítulo 6, de igual manera se realiza un análisis comparativo entre ésta y los valores establecidos en las normas. Así mismo, en este mismo capítulo se realiza una comparación con los datos obtenidos de manera experimental descritos en el acápite 5. Por último se lleva a cabo una discusión entorno a lo encontrado en el numeral 6.

5. Resultados Obtenidos y Análisis

En la figura 19 se presenta el procedimiento y los parámetros contemplados en cada una de las mediciones, de igual manera, los cálculos realizados y que posteriormente fueron comparados entre sí, con el fin de establecer el grado de influencia que tiene tanto el sistema de transporte público colectivo como masivo en la calidad del aire en Bogotá.

Figura 19. Procedimiento y parámetros para las pruebas.



5.1. Características físicas del Material Particulado en los puntos de muestreo.

El caudal registrado durante el periodo de muestreo en el Impactador – Uniandes fue de 70 ± 5 CFH y aplicando la ecuación (6) con los valores consignados en la tabla 11, el $Q_{std} = 60 \pm 5$ CFH. Con esto y de acuerdo a la ecuación (5) y a la información consignada en el anexo 4. Se obtienen los resultados para los puntos de muestreo City Tv y Edificio Julio Flórez (EJF). (Ver tabla 13). Es preciso señalar que City Tv_12 y EJF_12 corresponden a períodos de muestreo de 12 h, es decir que, t de la ecuación (5) es 96h. De igual manera City Tv_24 y EJF_24 tienen periodos de muestreo de 24 h, entonces, t en (5) es 192 h.

Es posible agrupar la información consignada en la tabla 13, de la siguiente manera: Partículas Suspendidas Totales (PST), Material Particulado con diámetro inferior a 10 μm (PM_{10}) y Material Particulado inferior a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). El primer grupo, de acuerdo a las especificaciones del equipo, corresponde a la suma aritmética, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, de la concentración estándar (C_{Std}) obtenida en cada una de las etapas del impactador. Para PM_{10} , son tomados los valores de C_{Std} que cumplen: $0.4 \mu\text{m} \leq d_{50} \geq 2.5 \mu\text{m}$. Por último, $\text{PM}_{2.5}$ agrupa las partículas con $d_{50} = 0.4 \mu\text{m}$.

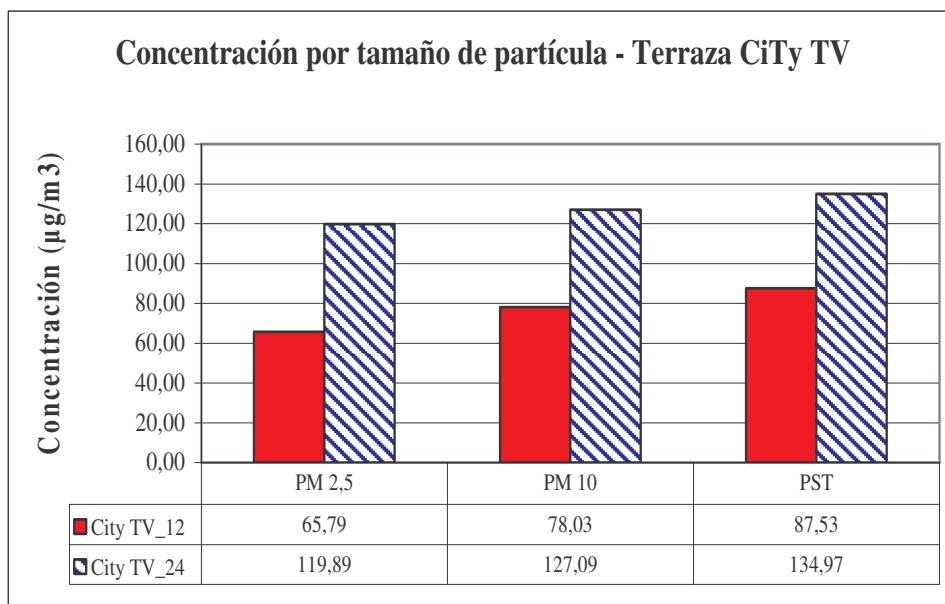
Tabla 13. Concentración de Material Particulado por Distribución de Tamaño – Equipo Uniandes

Sitio de Muestreo	Diámetro de corte d_{50} (μm)	Peso inicial (mg)	Peso Final (mg)	Diferencia Peso (mg)	C_{real} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	C_{Std} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
City TV_12	19,0	126,31	127,04	0,73	3,82	5,14
	9,0	125,87	126,49	0,62	3,25	4,36
	2,5	125,57	127,31	1,73	9,11	12,24
	0,4	333,35	342,66	9,31	48,97	65,79
City TV_24	19,0	124,88	125,91	1,03	2,72	3,65
	9,0	123,88	125,08	1,20	3,15	4,23
	2,5	124,30	126,34	2,04	5,36	7,20
	0,4	335,81	369,74	33,93	89,24	119,89
EJF_24	19,0	126,15	127,11	0,95	2,50	3,36
	9,0	124,02	124,92	0,90	2,38	3,19
	2,5	125,74	127,93	2,19	5,75	7,73
	0,4	335,57	345,27	9,69	25,50	34,26
EJF_12	19,0	125,75	126,35	0,60	3,16	4,24
	9,0	125,26	126,05	0,79	4,17	5,60
	2,5	126,20	128,23	2,02	10,64	14,29
	0,4	333,14	344,23	11,09	58,34	78,38

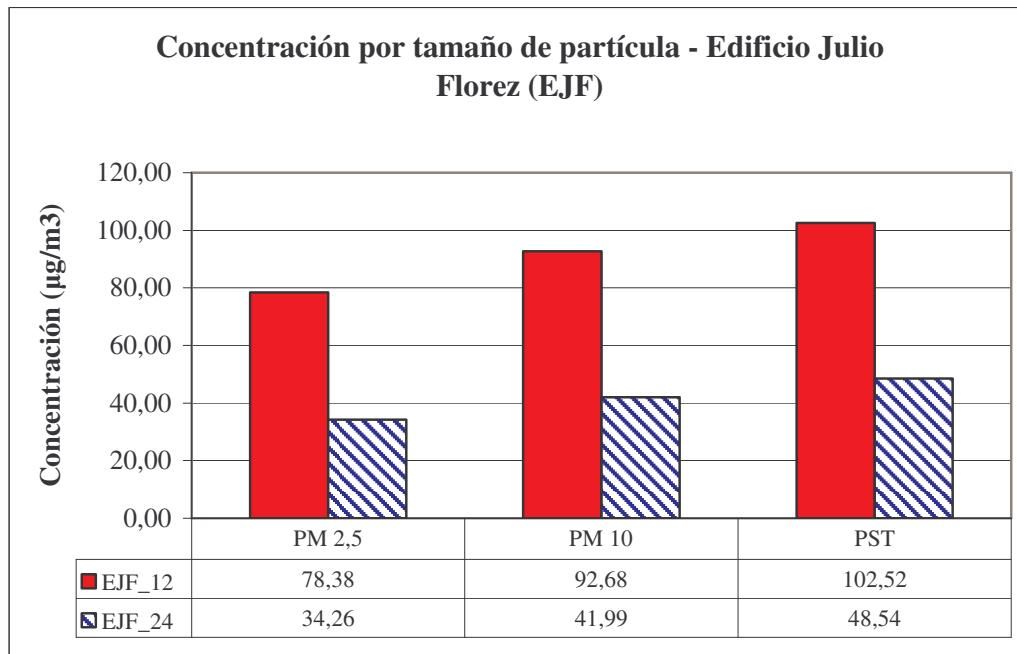
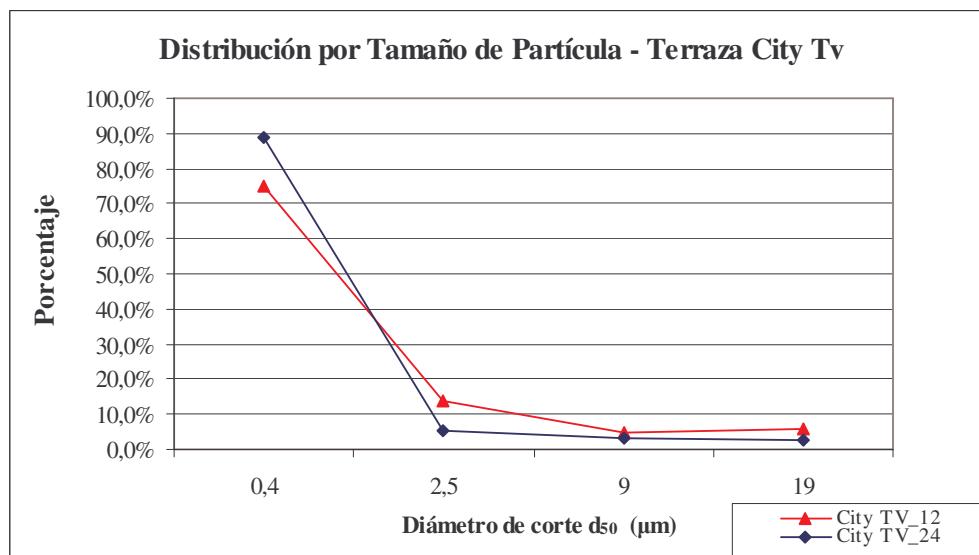
De acuerdo a lo anterior, se aprecia que el punto de muestreo City Tv arrojó una concentración mayor para el periodo de 24 horas en comparación con el de 12 horas, indicando la presencia de agentes externos, en horas de la noche, que inciden en la calidad del aire, diferentes a los buses articulados del sistema de Transmilenio (ver figura 20). De otra parte, en el punto EJF, el monitoreo de 12 horas mostró mayores valores de

concentración sobre el de 24 horas, lo cual determina que en esta zona, la emisión de PM está estrechamente ligada con las fuentes móviles, debido a que en horas de la noche el flujo vehicular disminuye de manera significativa y por ende la concentración de PM (ver figura 21).

Figura 20. Concentración por tamaño de partícula – Terraza City TV



Las figuras 22 y 23 presentan el aporte en porcentaje de cada una de las etapas del impactador en los dos sitios de muestreo. Se aprecia que en el caso del punto EJF, para el periodo de muestreo de 24 horas, existe un ligero aumento, sobre el de 12 horas, en el aporte de las partículas con un diámetro de corte (d_{50}) mayor a $2.5 \mu\text{m}$, se aprecia una leve disminución para la PM con $d_{50} = 0.4 \mu\text{m}$. Por el contrario, para City TV, el aporte porcentual para partículas mayores a $2.5 \mu\text{m}$ es menor en el caso del muestreo de 24 horas en comparación con el de 12 horas, sin embargo para partículas finas el periodo de 24 horas presenta un aporte, sobre el total del material recolectado, del 90% aproximadamente, mientras que para el de 12 horas este aporte corresponde al 75% aprox. sobre el total de la muestra.

Figura 21. Concentración por tamaño de partícula – Edificio Julio Florez (EJF)**Figura 22. Distribución por tamaño de partícula – Terraza City TV**

En la figura 24 es posible apreciar el comportamiento de las partículas, de acuerdo a su concentración y tamaño, para los puntos y períodos de muestreo establecidos. Las de mayor

tamaño, $d_{50}=19 \mu\text{m}$, presentan una disminución en su concentración para los períodos de 24 horas en ambos casos, es decir, el aporte de este tipo de partículas está ligado en mayor grado con la actividad económica que se lleva a cabo durante el día.

Las partículas con $d_{50}=9 \mu\text{m}$, continúan mostrando la tendencia a disminuir su concentración para los períodos de 24 horas, lo cual indica que el aporte en la noche es mínimo, sin embargo se aprecia que en el día la concentración es mayor en el punto EJF, mientras que en el muestreo de 24 horas, City TV presenta el valor más alto. Para las partículas con diámetro equivalente igual a $2.5 \mu\text{m}$, el comportamiento continua siendo el mismo, concentraciones altas durante el día, indicando una estrecha relación entre las emisiones de MP y el número de vehículos que circulan por la vía.

Figura 23. Distribución por tamaño de partícula – Edificio Julio Flórez (EJF)

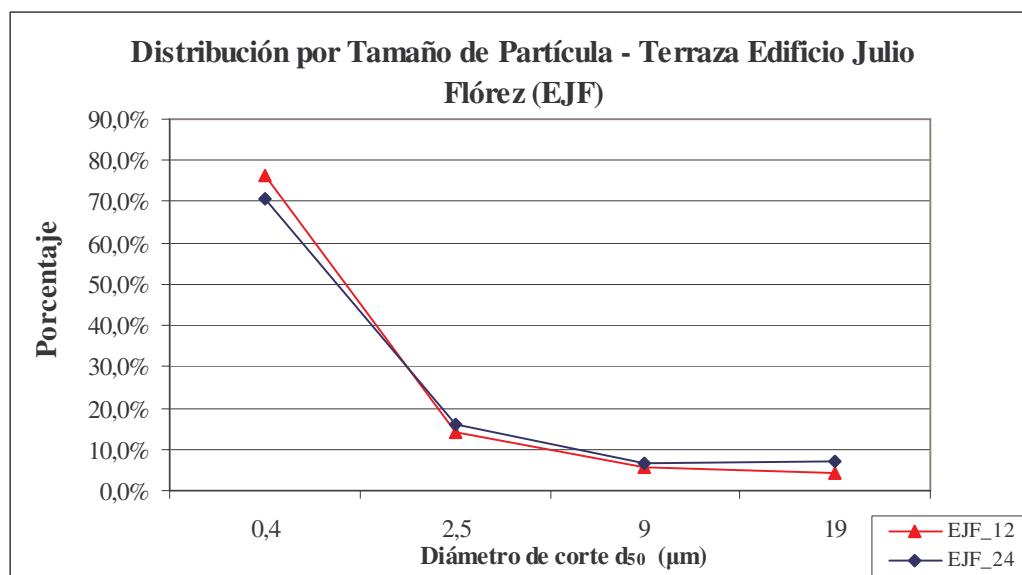
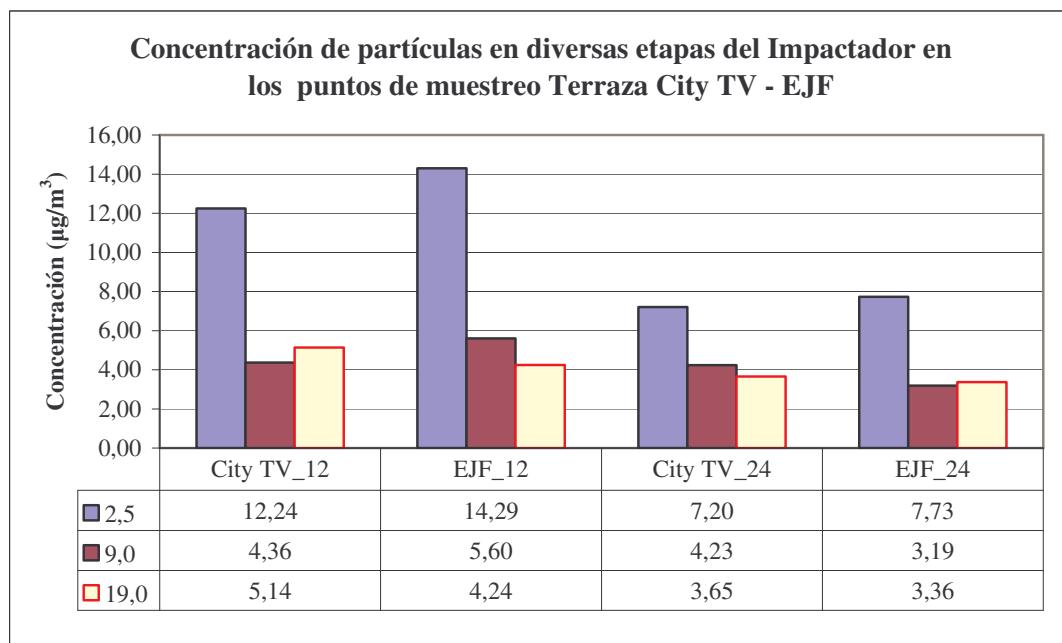


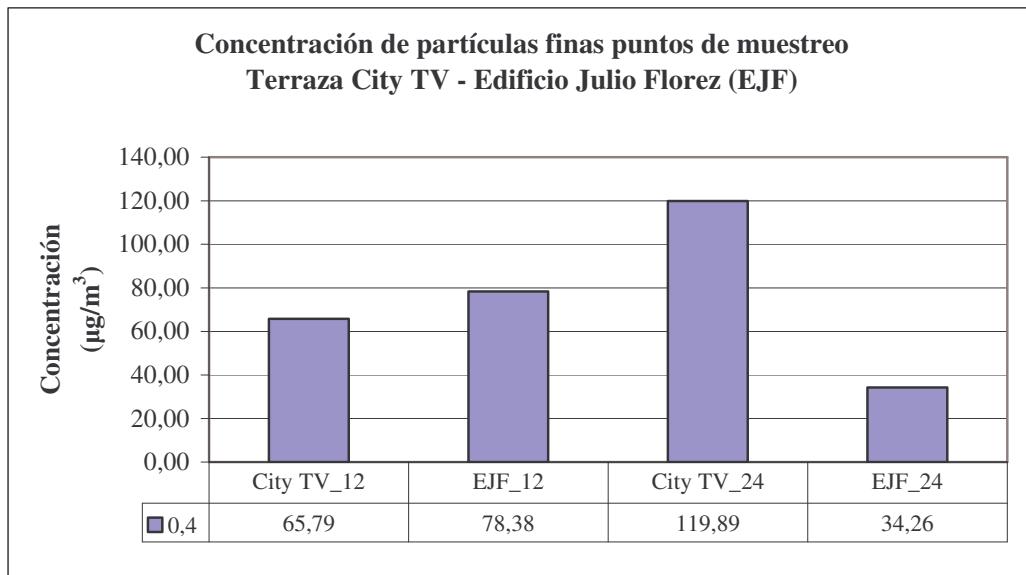
Figura 24. Concentración de partículas en diversas etapas del Impactador en los puntos de muestreo Terraza City TV - EJF



Ahora bien, tomando el hecho que la mayoría de las partículas emitidas por los motores diesel se encuentran entre $0.02 - 0.5 \mu\text{m}$ ³², la figura 25 presenta el comportamiento de las partículas finas. De aquí se observa que, la tendencia de la figura 24 a disminuir la concentración de las partículas para períodos más largos de medición, no se conserva, mostrando un incremento significativo el punto City TV. El valor de concentración para City TV_12 está en $65.79 \mu\text{m}$, mientras que para City TV_24 es de $119.89 \mu\text{m}$, representando un incremento del 82.2% con respecto al primero. En el caso del EJF, la concentración disminuye en 56.3% para 24 horas en comparación con el de 12.

³² Jun Kagawa, Health effects of diesel exhaust emissions - a mixture of air pollutants of worldwide concern Toxicology 181_182 (2002) 349_353. Tomado de: www.elsevier.com/locate/toxcol, Mayo de 2006.

Figura 25. Concentración de partículas finas puntos de muestreo
Terraza City TV - Edificio Julio Florez (EJF)



Como se mencionó en el numeral 5.2.1, las mediciones en el punto de City Tv 12 horas, fueron realizadas en conjunto con el equipo Tisch Environmental – 404 (ver tabla 14), a cargo de Vilma Palma estudiante de la Maestría en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional. Éste por ser un equipo debidamente certificado, contaba con las siguientes especificaciones de calibración; $Q = 28,3 \frac{L}{min}$ para $T = 24^\circ C$ y $P = 749$ mmHg, por

consiguiente para las condiciones de Bogotá el caudal real es igual a: $\frac{P_c \cdot Q_c}{T_c} = \frac{P_B \cdot Q_B}{T_B}$,

donde los subíndices c y B corresponden a las condiciones de calibración y de Bogotá respectivamente. Con esto

$$Q_B = 36,3 \frac{L}{min} \text{ y } Q_{Std} = 31,2 \frac{L}{min}.$$

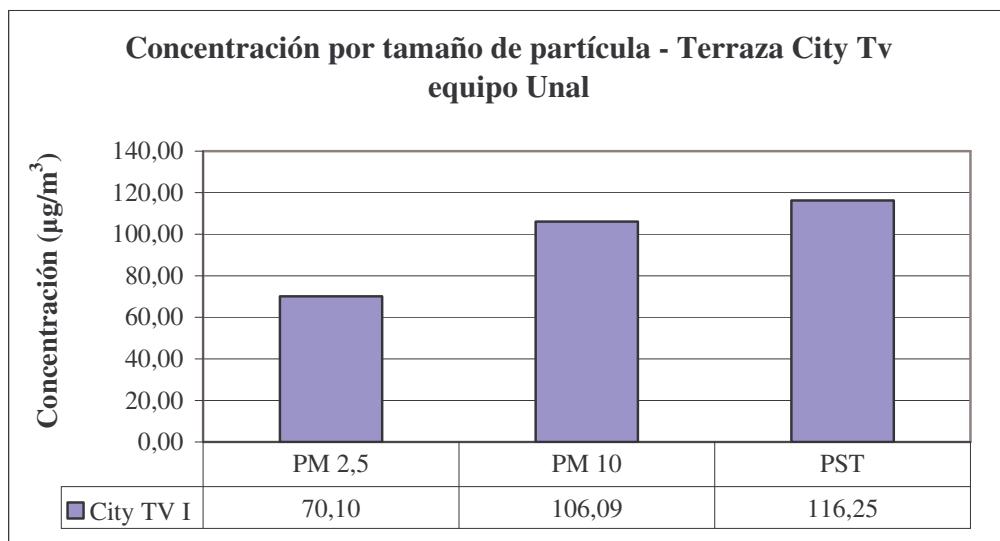
Tabla 14. Resultados muestreo equipo Universidad Nacional - Terraza CiTy TV³³

FILTROS	City TV I	City TV II
	Concentración promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) STD	Concentración promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) STD
9,0 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 10 \mu\text{m}$	10,16	12,25
5,8 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 9 \mu\text{m}$	10,22	8,72
4,7 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 5,8 \mu\text{m}$	7,51	3,82
3,3 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 4,7 \mu\text{m}$	8,17	5,79
2,1 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 3,3 \mu\text{m}$	10,09	7,23
1,1 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 2,1 \mu\text{m}$	21,65	20,50
0,7 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 1,1 \mu\text{m}$	23,95	22,99
0,4 $\mu\text{m} < \text{ECD} < 0,7 \mu\text{m}$	21,38	20,72
ECD<0,4 μm	3,12	36,29

Agrupando los valores de la tabla 14 en PST, PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, es posible apreciar una mayor concentración de PM para el punto City Tv, siendo más marcada para $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} . En el primer caso, la concentración para el punto City Tv es cerca del 90% mayor en comparación con el obtenido en el punto Florida. Para el PM_{10} este incremento es del 50% aproximadamente. Por último la existe una leve diferencia (10% aprox.) entre las concentraciones obtenidas para las PST. (Ver figura 26)

³³ Datos suministrados por Vilma Palma dentro de su tesis de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Ambiental “Distribución de Tamaño de Partículas Respirables en Áreas Afectadas por Tráfico Vehicular”. Los muestreos fueron realizados para períodos de 12 horas.

Figura 26. Concentración por tamaño de partícula - Terraza City Tv equipo Tisch Environmental – 404 (Unal)



5.2. Características químicas del Material Particulado en los puntos de muestreo.

Como se mencionó en el numeral 5.3, para la caracterización química del material particulado, fue empleado el método de espectroscopia por absorción atómica con horno de grafito, para esto se utilizó el Espectrómetro M-Series de los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad Nacional (ver figura 27), de igual manera el proceso de análisis estuvo bajo la supervisión del profesor Oscar Suárez de esta misma universidad.

Los metales analizados fueron Manganese (Mn), Cadmio (Cd), Cobre (Cu) y Cromo (Cr). En primera medida, fueron determinadas las curvas de calibración por medio de la absorbancia a partir de unas soluciones estándar preparadas en laboratorio. El anexo 4 muestra la ecuación adoptada en cada uno de los análisis, así como la desviación estándar en cada uno de los casos. Es preciso mencionar que como parámetro fue establecido que las curvas no podían arrojar valores menores a 0.97.

Figura 27. Fotografía del Espectrómetro M-Series de los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad Nacional



De acuerdo a lo establecido en el numeral 5.3, el volumen de la solución es de 100 ml, una vez obtenidos los resultados del espectrofotómetro fue aplicada la siguiente ecuación para determinar la concentración del metal en las muestras de aire.

$$C_m = \left(\frac{C_d - C_{Fb}}{Q_{real} \cdot t} \right) \cdot V_d \quad (6)$$

Donde:

C_m = Concentración del metal en aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_d = Concentración del metal en la solución ($\mu\text{g}/\text{L}$ ó Ppb)

C_{Fb} = Concentración del metal en el filtro blanco ($\mu\text{g}/\text{L}$ ó Ppb)

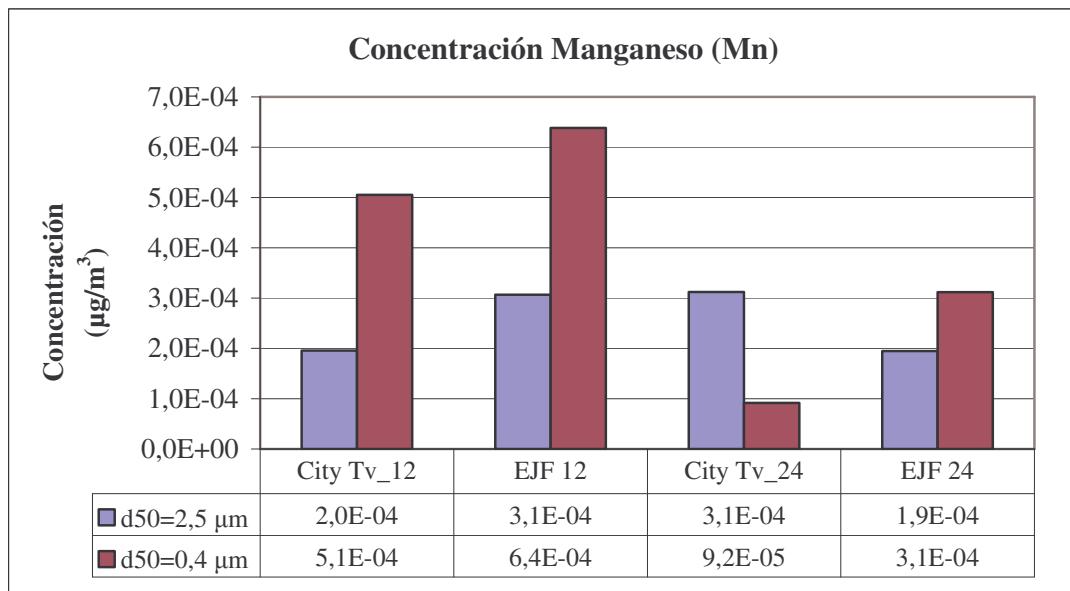
Q_{real} = Flujo volumétrico de aire (m^3/min)

t = Tiempo de muestreo (12 ó 24 horas)

V_d = Volumen total de la solución (L)

Los resultados de estos cálculos se presentan en el anexo 5. Es preciso señalar que los filtros analizados en esta sección corresponden a las muestras recolectadas en las etapas 5 y 8 del Impactador de la universidad de Los Andes, las cuales retienen partículas con un diámetro de corte (d_{50}) igual a $2.5\mu\text{m}$ y $0.4\mu\text{m}$ respectivamente. A continuación se muestran las gráficas con los resultados obtenidos para la concentración de metales en las muestras de aire.

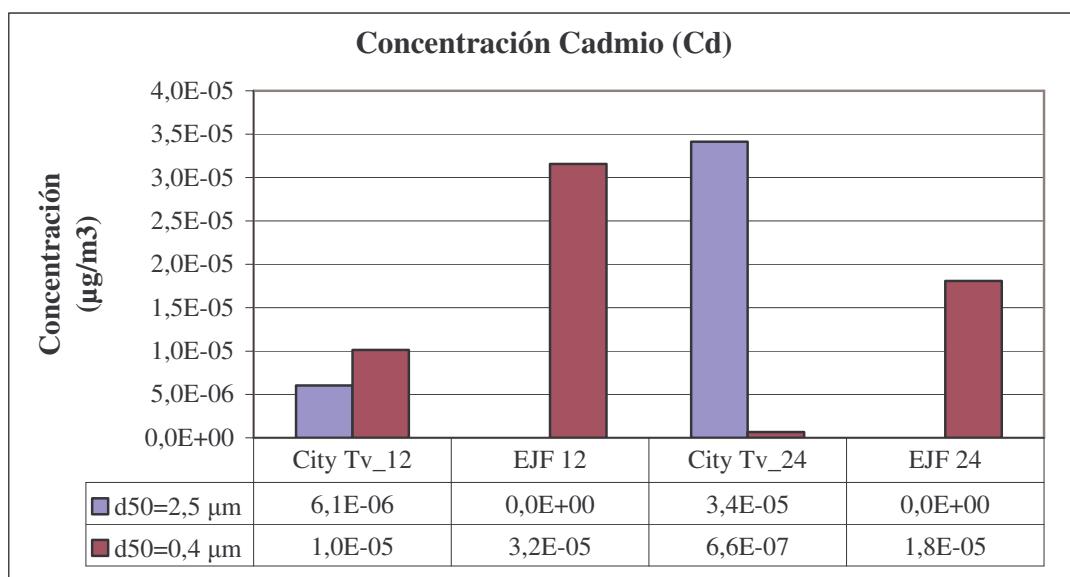
Figura 28. Concentración Manganese (Mn)



En la figura 28 se aprecia que, para el período de muestreo de 12 horas, las partículas de menor diámetro de corte ($0.4\mu\text{m}$) retienen mayor cantidad de Mn, siendo más alta la concentración, en el punto EJF_12 (25.5% mayor que City Tv_12). Es preciso anotar que al revisar el comportamiento de la concentración del metal para el periodo de 24 horas, se evidencia una notable disminución en la presencia de Mn para los dos puntos, es decir, existe mayor cantidad de Mn en el aire en las horas del día, lo cual indica una estrecha relación de ésta con la actividad vehicular de la zona.

De igual manera, es interesante ver como; en las partículas de mayor tamaño ($d_{50}=2.5 \mu\text{m}$), la tendencia a disminuir la concentración en el muestreo de 24 horas, no se presenta en City Tv, puesto que la presencia de Mn se incrementa en un 55% para City Tv_24 con respecto a City Tv_12, mientras que las partículas con $d_{50}=0.4\mu\text{m}$, la concentración de Mn disminuye en 82% con respecto al muestreo de 12 horas. Para el punto EJF, en ambos casos se presenta una disminución en la concentración de Mn, en el caso de las partículas con diámetro igual a $0.4 \mu\text{m}$ el decremento en la concentración es del 51% para el periodo de 24 horas con respecto al obtenido en EJF_12, en cuanto a las partículas con $d_{50}=2.5\mu\text{m}$ este decremento es del 38.7%.

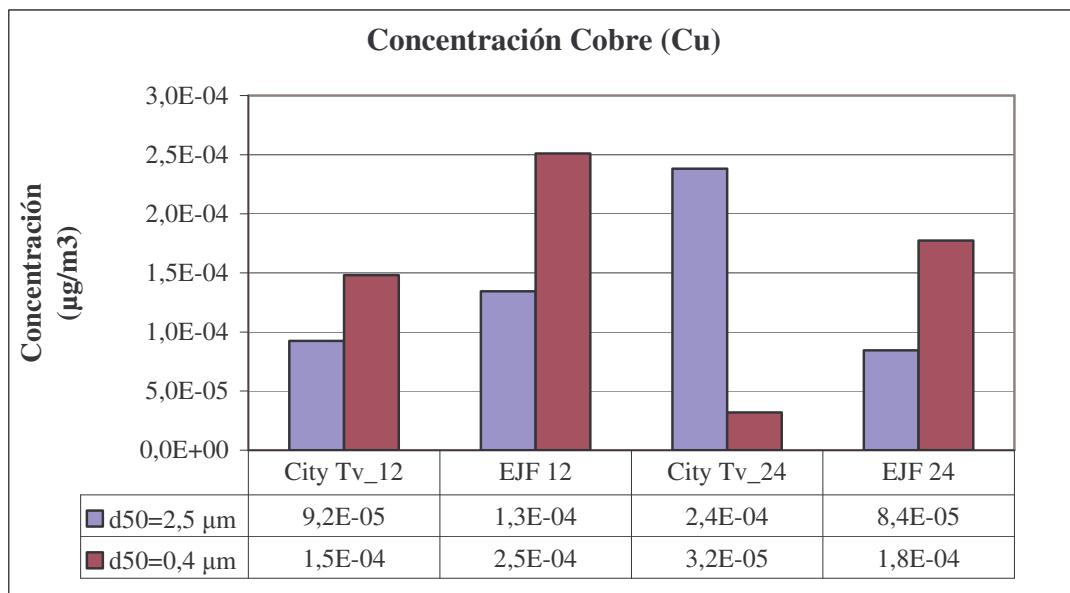
Figura 29. Concentración Cadmio (Cd)



Para el Cadmio, se aprecia en la figura 29 que, en el punto EJF no se registró la presencia de este metal en las partículas con diámetro equivalente de $2.5\mu\text{m}$, por el contrario en las de $0.4\mu\text{m}$ la concentración fue mayor en comparación con el punto City Tv, Ahora bien, en el punto City Tv fue detectado este metal en los dos filtros analizados, siendo mayor la concentración en la partículas con $d_{50}=2.5 \mu\text{m}$ y para el período de 24 horas, lo cual supone la presencia de agentes externos que contribuyen a una mayor concentración, de otra parte,

en las partículas de menor tamaño ($d_{50}=0.4\mu\text{m}$), la presencia de Cd en el período de 24 horas es muy pequeña en comparación con la detectada en City Tv_12 (93.4% menor)

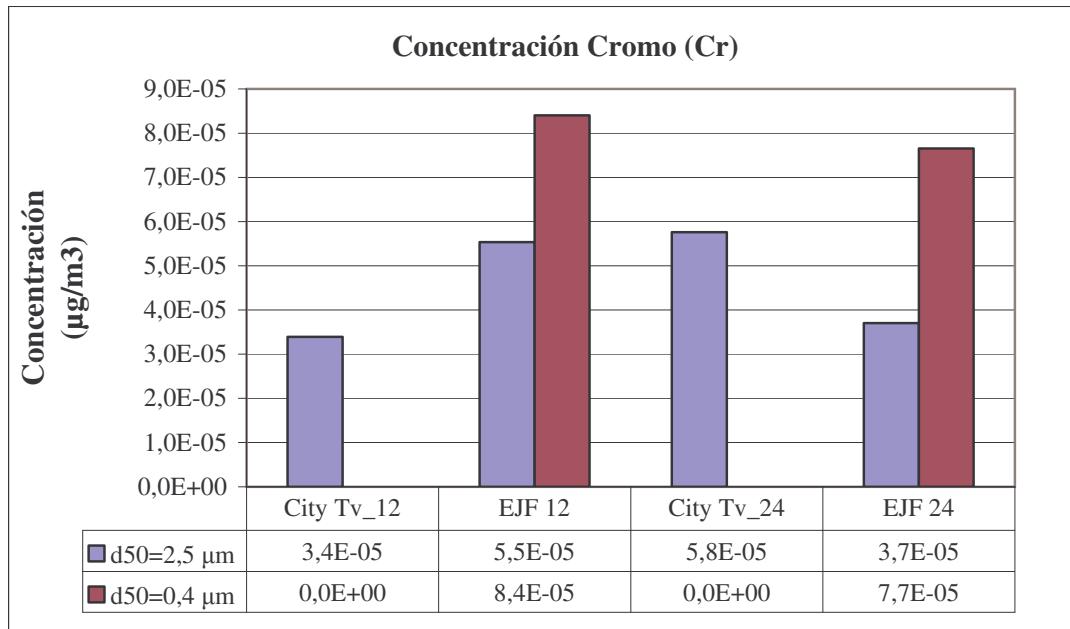
Figura 30. Concentración Cobre (Cu)



En la figura 30 se presentan los resultados obtenidos para el Cu, aquí se observa una mayor concentración (67% mayor) en el punto EJF_12 sobre el punto City TV_12. No obstante, se evidencia una mayor tendencia de estas partículas a retener el metal para los períodos de muestreo de 12 horas. En las partículas con d_{50} igual a $2.5\mu\text{m}$ se presenta un incremento en la concentración para City Tv_24.

En los análisis de Cr (figura 31), se determinó que en el punto City TV no hay presencia de este metal en las partículas finas, solo se logró detectar en las partículas con diámetro equivalente a $2.5\mu\text{m}$, siendo en este punto 70% mayor la concentración para el período de 12 horas sobre el de 24. En cuanto al punto EJF, las partículas finas retuvieron mayor cantidad de este metal sobre las partículas de $2.5\mu\text{m}$ de diámetro equivalente. En los dos tiempos de muestreo el metal se concentró en las partículas finas ($d_{50}=0.4\mu\text{m}$).

Figura 31. Concentración Cromo (Cr)



5.3. Concentración de PM10 y PM2.5 en las estaciones de Monitoreo del DAMA

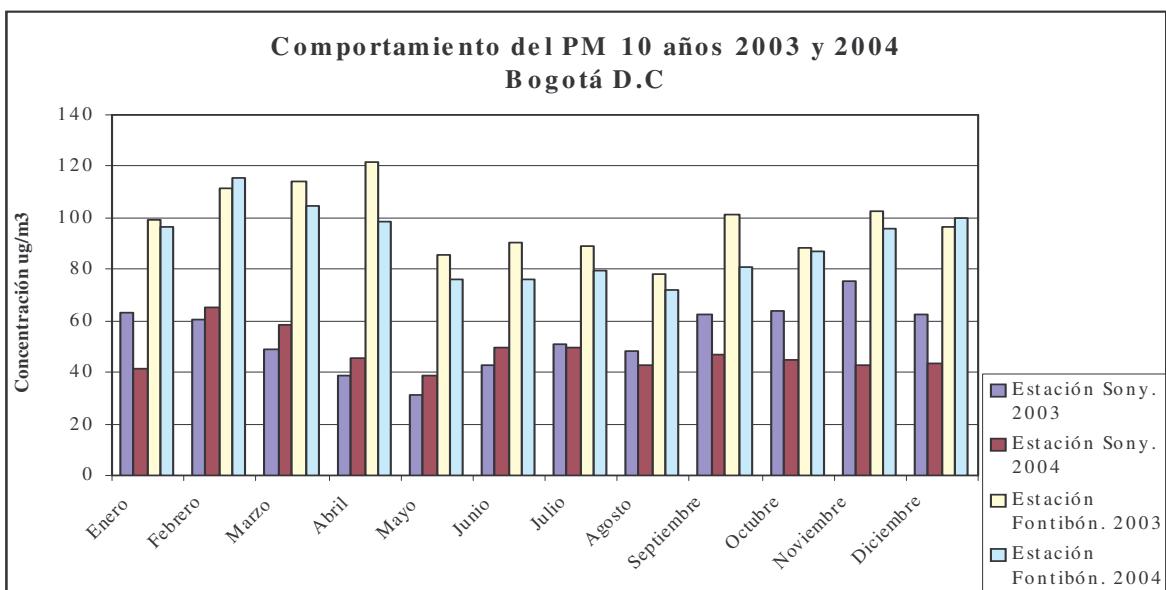
Aquí se consigna la información de las estaciones de monitores del DAMA. La tabla 15 presenta las características de cada una de las 16 estaciones con las que cuenta el distrito capital.

Tabla 15. Características Estaciones Red de Monitores Calidad del Aire.

El análisis consiste en determinar el promedio aritmético de las concentraciones medias diarias en 365 días y en 24 horas, como lo establece la norma. En ese sentido, la figura 37 presenta los valores anuales para el PM₁₀ de las estaciones de monitoreo Sony y Fontibón. Es preciso señalar que las estaciones aquí analizadas se encuentran en zonas con características particulares. En primer lugar, la estación Sony se encuentra ubicada en una zona industrial con alto tráfico vehicular y de uso residencial, y, la estación Fontibón recoge información de una zona con alto tráfico vehicular, caracterizada por ser de uso residencial y comercial.

De la figura 32 se puede apreciar que para la estación Sony, la mayor concentración de PM₁₀ presentada en el 2003 fue de 75 ug/m³ en el mes de Noviembre y para el 2004 fue de 65 ug/m³ en el mes de febrero. Analizando los valores del anexo 1, se aprecia que los días críticos para el mes de Noviembre de 2003 se concentraron en el martes, miércoles y jueves con concentraciones de 87 ug/m³, 82 ug/m³ y 82 ug/m³. Para el mes de Febrero de 2004 los días críticos fueron el lunes con 70 ug/m³ y el jueves con una concentración de PM₁₀ de 71 ug/m³.

Figura 32. Comportamiento del PM 10 en las Estaciones de Monitoreo Sony y Fontibón (2003 - 2004)



Para la estación Fontibón el máximo para el 2003 se presenta en el mes de Abril con un valor de 122 ug/m³, siendo el valor máximo de concentración (182 ug/m³) un viernes. Para el 2004 el mes de Febrero presenta un promedio máximo de 116 ug/m³, siendo el martes el día más crítico con 132 ug/m³. Es preciso señalar que en ninguno de los dos casos se supera la norma para 24 h.

De acuerdo con las tabla 16, la concentración anual en la zona de la Estación Sony presenta una disminución del 13% para el año 2004 con respecto al 2003, de la información suministrada en el cuadro 2 se puede decir que en ninguno de los dos años fue superado el valor anual establecido por el DAMA. En cuanto a la Estación de Fontibón este valor, para el 2004 presenta una ligera disminución con respecto al 2003 (8%). Al igual que los datos obtenidos en la Estación Sony, no hubo ninguna situación crítica en la que fuera superada la norma del DAMA.

Tabla 16. Concentraciones PM₁₀ Estación Sony y Fontibón (2003-2004).

Estación Sony. PM ₁₀		Estación Fontibón. PM ₁₀	
Mes	2.003	Mes	2.003
Enero	63	99	96
Febrero	60	111	116
Marzo	49	114	104
Abril	39	122	99
Mayo	31	85	76
Junio	43	90	76
Julio	51	89	79
Agosto	48	78	72
Septiembre	62	101	81
Octubre	64	88	87
Noviembre	75	103	96
Diciembre	63	96	100
Prom.	54	Prom.	98
Anual	47	Anual	90

Las unidades están dadas en ug/m³

A continuación se toma la información obtenida para las estaciones de monitoreo 5 (IDRD) y 10 (Santo Tomás) del DAMA. En este sentido se analiza información que corresponde a datos de 2004 y 2005 para Material Particulado (Tabla 17). De aquí se aprecia que la mayor concentración de $\text{PM}_{2.5}$ se presenta en día miércoles y el sábado para enero y febrero de 2005 respectivamente.

Tabla 17. Características Estaciones Red de Monitores Calidad del Aire.

Día	Ene-05	Feb-05
Lunes	35,28	30,31
Martes	41,84	41,82
Miércoles	32,32	53,03
Jueves	29,43	42,66
Viernes	32,06	34,04
Sábado	42,43	31,42
Domingo	30,94	22,81

Las unidades están dadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 33. Promedio diario concentración $\text{PM}_{2.5}$ – Estación IDRD

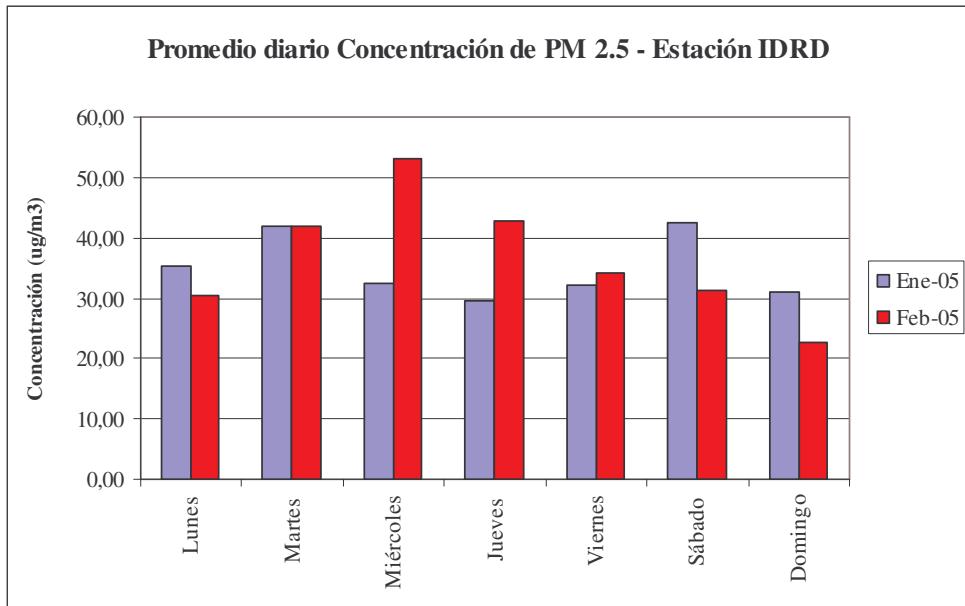


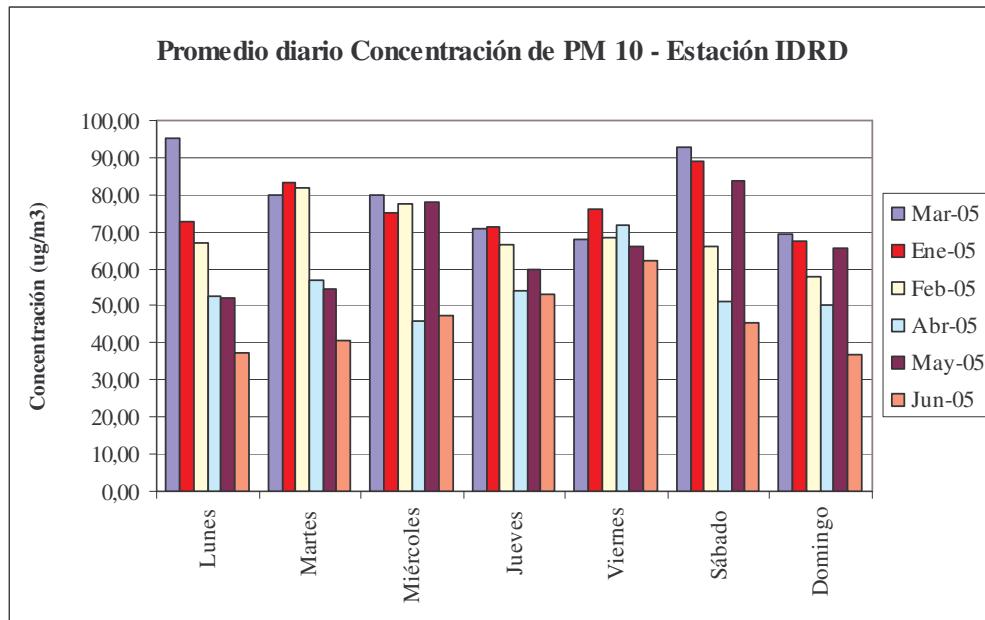
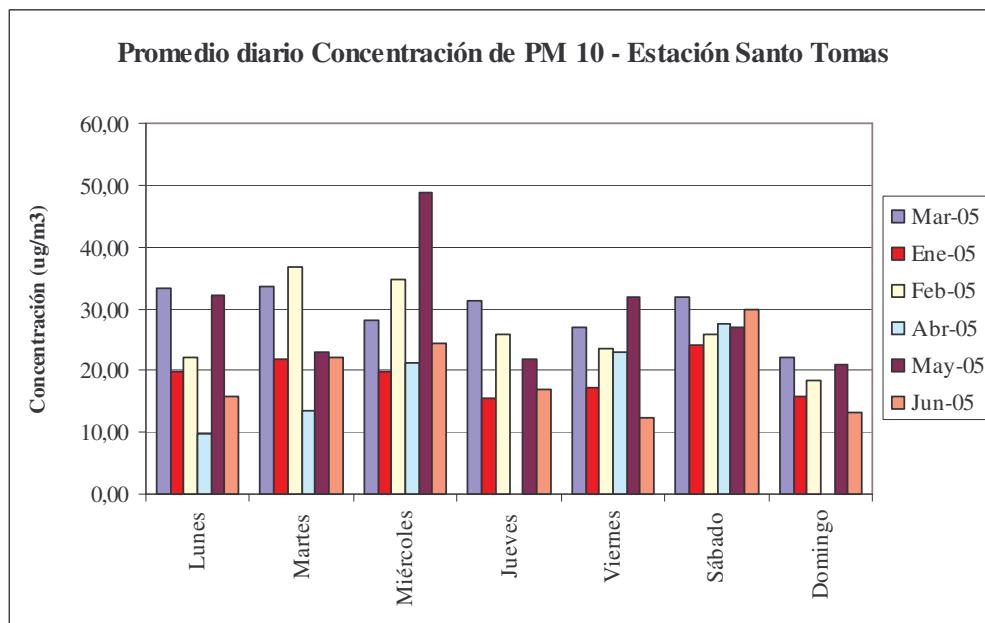
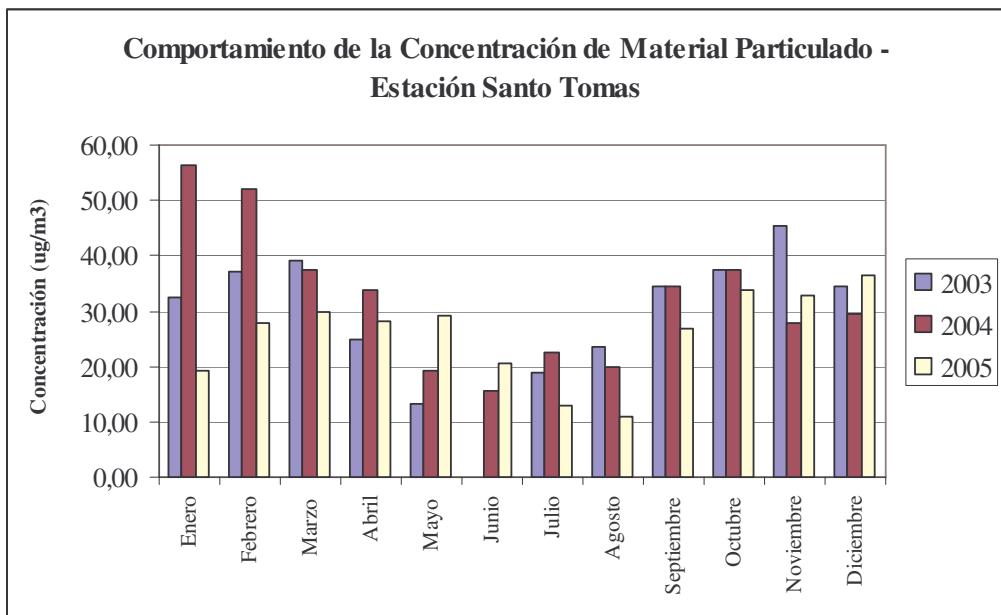
Figura 34. Promedio diario concentración PM₁₀ – Estación IDR**Figura 35. Promedio diario concentración PM₁₀ – Santo Tomas**

Figura 36. Comportamiento concentración PM₁₀ – Estación IDRD

6. DISCUSIÓN EN TORNO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Como se logró observar en la tabla 2, Colombia presenta bastantes reglamentaciones en el tema de calidad de aire, sin embargo, existe una descentralización marcada en este aspecto, dado que el Decreto 948 de 1995 faculta a los municipios y distritos para implementar normas en el tema de calidad de Aire. Por esto, el Departamento Técnico-Administrativo del Medio Ambiente – DAMA – maneja sus propios estándares de calidad del aire para el área metropolitana de la capital de la república. Tal es el caso de las normas que regulan la concentración de PM₁₀ y de los SO₂, en donde para un período anual, a escala nacional la concentración máxima es de 100 µg/m³ para los dos contaminantes, al comparar este valor con lo impuesto por el DAMA, se puede determinar que en Bogotá la norma es un 35% más exigente y en cuanto al SO₂ un 12%.

En el ámbito Latinoamericano las normas de calidad de aire son más exigentes que las Nacionales, al contrastarlas con las chilenas se aprecia que está última, en el control de las emisiones de PM es un 20% más exigente. Pero esta tendencia se agudiza si se toma como

referencia la norma Federal de los Estados Unidos y la Estatal de California, donde la primera es 50% más exigente, mientras que la segunda es más rigurosa en un 88%. En el caso Europeo la norma exige una concentración 40% menor que la colombiana. Tomando ahora una concentración máxima para un periodo de 24 horas del Oxido de Nitrógeno, se aprecia que la norma Distrital disminuye este factor en 15%.

Esta marcada descentralización sumada a la flexibilidad de los estándares de calidad de aire, trae como consecuencia la ausencia de un mecanismo severo que permita el control de los contaminantes, por lo que se presenta con frecuencia violaciones a los valores establecidos. De otra parte, es evidente, de la bibliografía consultada que, el mayor desarrollo de la gestión de la calidad del aire en la región ocurre principalmente en Ciudad de México y Santiago de Chile. Estas ciudades cuentan con programas de vigilancia de la calidad del aire e impacto sobre la salud y se encuentran en la fase de implementación de planes viables de control y prevención.

En el caso de Bogotá, existen diversos factores que influyen en el control de las emisiones de fuentes móviles, como lo es la antigüedad del parque automotor, el mantenimiento que reciben los vehículos de transporte público colectivo (Buses, Busetas, Microbuses) y la calidad del combustible Diesel distribuido en la capital. En este sentido, la agencia de Cooperación Japonesa - JICA – logró determinar que, en promedio, el 60% de vehículos de transporte público colectivo tenía más de 12 años de antigüedad y el 36 más de 19 años.³⁴ En posteriores estudios realizados por el Banco Mundial se estimó que el parque automotor de transporte colectivo tiene más de 20 años³⁵.

En 1999 se implementa el Sistema Transmilenio, un servicio de transporte masivo automotor de pasajeros, el cual cuenta en la actualidad con 850 buses articulados

³⁴ JICA. Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 1992. The study on air pollution control plan in Bogotá city area. Bogotá.

³⁵ Banco Mundial, 1997. Contaminación atmosférica por vehículos automotores, experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina.

(vinculados al 31 de mayo 2006³⁶), los cuales emplean como combustible gas natural y en especial combustible Diesel. El sistema inicia su funcionamiento en la ciudad de Bogotá como una alternativa que contribuye a la sostenibilidad ambiental urbana, por esto, vincula al parque automotor de la capital una flota con tecnología más limpia y eficiente. De acuerdo con los aforos vehiculares en el 2004, sobre la avenida Jiménez transitan en total 359 buses (ver tabla 18), es necesario enfatizar que, a la altura de la carrera séptima, donde fue ubicado el equipo de Uniandes, solo se permite el paso a los buses articulados del sistema Transmilenio.

Tabla 18. Número de buses sobre la avenida Jiménez para un día viernes de 2004

Hora	No. Buses		Acumulado
	Oriente - Occidente	Occidente - Oriente	
6:00 AM	4	2,5	6,5
7:00 AM	17	18	35
8:00 AM	18,5	20,5	39
9:00 AM	17	17	34
10:00 AM	8,5	10	18,5
11:00 AM	11	10	21
12:00 PM	11	12	23
1:00 PM	9,5	9,5	19
2:00 PM	10	9,5	19,5
3:00 PM	11,5	10	21,5
4:00 PM	11,5	13	24,5
5:00 PM	15	15,5	30,5
6:00 PM	9	7,5	16,5
7:00 PM	12,5	13	25,5
8:00 PM	12,5	12,5	25
Total	178,5	180,5	359

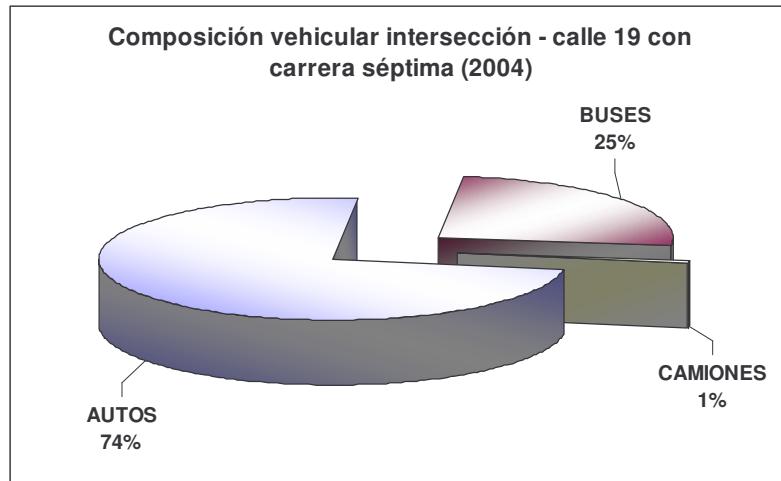
Tomado y adaptado de: Aforos Secretaría de Transito de Bogotá. 2004

En la intersección de la Calle 19 con carrera séptima donde se ubicó el Impactador de la Universidad de los Andes, la composición del parque automotor está dado por un 74% de vehículos particulares, 25% de buses y 1% de camiones (ver figura 37). De acuerdo con los

³⁶ Tomado de http://www.transmilenio.gov.co/transmilenio/frameset_buscador.asp. Última visita Julio 15 de 2006

datos suministrados por la Secretaría de Tansito y Transporte de Bogotá, transitan en un día 3264 automóviles, 2267 buses y 45 camiones.

Figura 37. Composición vehicular intersección – calle 19 con carrera séptima (2004)



Tomado y adaptado de: Aforos Secretaría de Transito de Bogotá. 2004

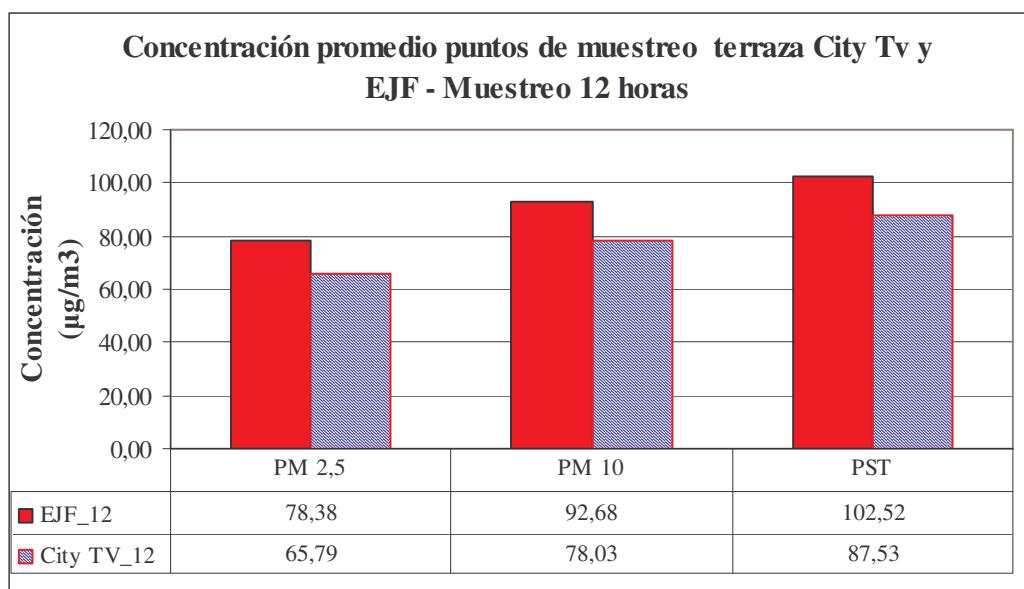
Tabla 19. Número de buses sobre la avenida Jiménez para un día viernes de 2004

Hora	Oriente - Occidente			Oriente - Occidente			Total		
	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones	Autos	Buses	Camiones
6:00 AM	82,3	60,0	1,0	102,3	89,8	1,5	184,5	149,8	2,5
7:00 AM	150,0	64,8	0,5	142,8	98,8	1,3	292,8	163,5	1,8
8:00 AM	147,5	63,5	1,0	135,3	96,3	2,3	282,8	159,8	3,3
9:00 AM	114,3	84,3	1,0	155,0	91,5	4,0	269,3	175,8	5,0
10:00 AM	93,8	74,8	5,3	155,0	84,3	2,3	248,8	159,0	7,5
11:00 AM	110,0	93,0	3,0	130,8	91,3	2,8	240,8	184,3	5,8
12:00 PM	118,0	82,5	1,8	131,0	73,3	1,0	249,0	155,8	2,8
1:00 PM	75,3	63,3	0,3	113,8	80,0	1,8	189,0	143,3	2,0
2:00 PM	96,5	54,3	1,8	123,3	80,5	2,5	219,8	134,8	4,3
3:00 PM	68,5	74,0	1,3	138,8	73,0	1,5	207,3	147,0	2,8
4:00 PM	56,8	66,8	2,5	153,0	73,0	2,3	209,8	139,8	4,8
5:00 PM	57,8	67,3	1,3	126,3	74,3	0,3	184,0	141,5	1,5
6:00 PM	57,8	64,0	0,3	131,0	67,5	0,5	188,8	131,5	0,8
7:00 PM	87,8	63,3	0,3	116,0	67,5	0,5	203,8	130,8	0,8
8:00 PM	94,3	60,0	0,0		46,8		94,3	106,8	0,0
9:00 PM		44,3					0,0	44,3	0,0
Total	1410,25	1079,75	21	1854	1187,5	24,25	3264,25	2267,25	45,3

Tomado y adaptado de: Aforos Secretaría de Transito de Bogotá. 2004

En la figura 38, se evidencia la tendencia en la distribución de tamaño de las partículas recolectadas en los ejes viales, es preciso señalar que, en ninguno de los casos fue superada la norma de 24 horas, establecida por el DAMA para PM₁₀ (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), registrando concentraciones de PM_{2,5} en el corredor de la Jiménez de 78.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 92.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en el corredor de la calle 19. Se presenta de esta manera un incremento del 19% con respecto a la avenida Jiménez.

Figura 38. Concentración promedio puntos de muestreo terraza City Tv y EJF – Muestreo 12 horas equipo Uniandes



Por lo anterior, se concluye que la diferencia en términos de emisiones de PM entre los dos ejes viales no es significativa, pese al hecho que en el eje vial de la Jiménez transiten exclusivamente los buses articulados del Sistema Transmilenio. Lo anterior obedece principalmente a la calidad en el combustible Diesel, el cual presenta un contenido de azufre de 1200 ppm y 4500 ppm en el resto del país. Si bien es cierto, los buses articulados de Transmilenio renuevan el parque automotor e incluyen nuevas tecnologías para el control de emisiones, éstas requieren de ciertas condiciones para lograr un funcionamiento óptimo. En un estudio realizado por Giraldo L, y Behrentz E, se determinó que al renovar la flota de transporte público sin mejorar la calidad del combustible se alcanzaba una

reducción del 6% en las emisiones de PM_{10} , mientras que, al mejorar la calidad del combustible y renovar la flota las emisiones disminuyen en un 47%³⁷.

En este sentido, es necesario mencionar que, los procesos de combustión en los motores Diesel, se fundamentan principalmente en la formación del dardo de combustible y posterior atomización, rompimiento y distribución de gotas, parámetros que están estrechamente ligados con las propiedades del combustible; tensión superficial, viscosidad y densidad. Luego, la vaporización del combustible pulverizado, está determinada por el calor específico ($C\rho$), la conductividad térmica y presión de vapor³⁸.

Al existir un mayor contenido de azufre el proceso de combustión se ve alterado y en esta medida se hace menos eficiente, incrementando la tendencia a la generación de carbonilla durante la combustión, y por ende un incremento en las emisiones de Material Particulado, afectando cualquier sistema de control de emisiones propio del vehículo.

Para la medición de 24 horas, la tendencia presentada es diferente, debido a que se existe mayor concentración de PM en el corredor de la Avenida Jiménez, acercándose la concentración de PM_{10} ($127 \mu g/m^3$) al límite establecido por el DAMA de $150 \mu g/m^3$ (ver figura 39). Sin embargo se presenta la misma tendencia en cuanto a la composición del material particulado. Existe una hipótesis que sustenta este hecho, ésta corresponde a que dadas las características físicas del sitio donde se encontraba instalado el equipo (figura 40), se genera un canal donde la velocidad del viento disminuye, lo cual genera una resuspensión del material particulado en horas de la noche, incrementando su concentración. Sin embargo, es necesario realizar mediciones para periodos de 12 horas pero en la noche, así mismo contar con equipos de medición de dirección y velocidad del viento en el sitio de muestreo.

³⁷ Giraldo L, Behrentz E. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variable pertinentes. Universidad de los Andes, Bogotá 2005. Disponible en http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2006_primer_semestre/00006639.pdf

³⁸ Gutiérrez N. Los aceites vegetales como combustibles en los motores Diesel – Análisis de mezclas de aceite con alcohol y gasoil. Universidad de los Andes. Bogotá 2005. Disponible en http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2005_segundo_semestre/00004831.pdf?

**Figura 39. Concentración promedio puntos de muestreo terraza City Tv y EJF
Muestreo 24 horas**

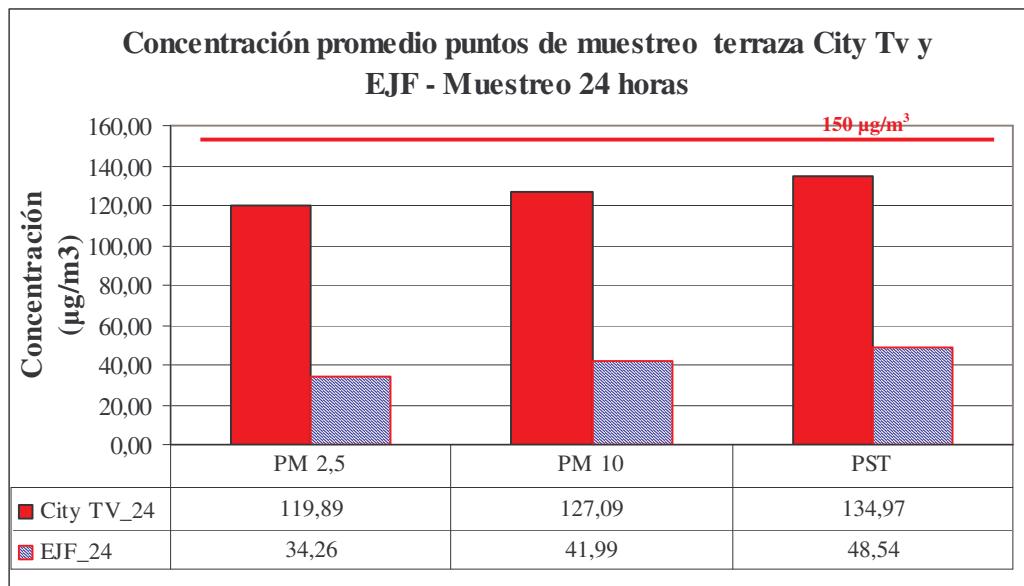
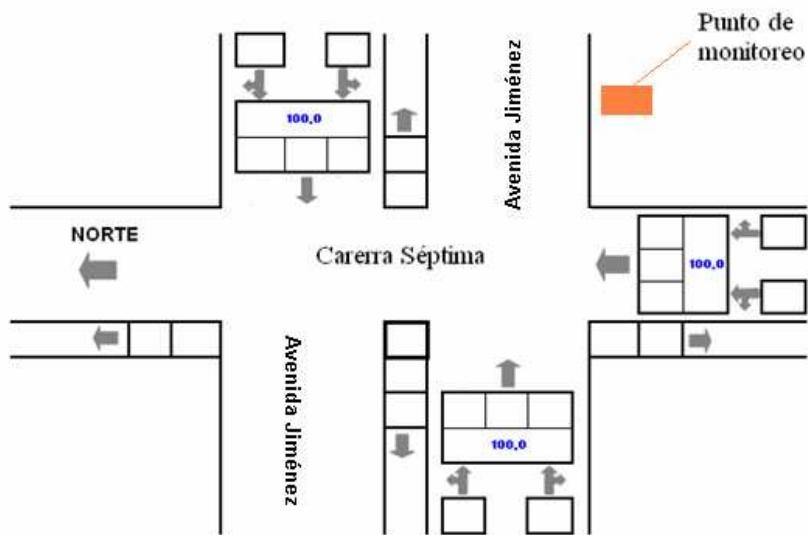


Figura 40. Esquema de instalación equipo Uniandes en la terraza de City Tv

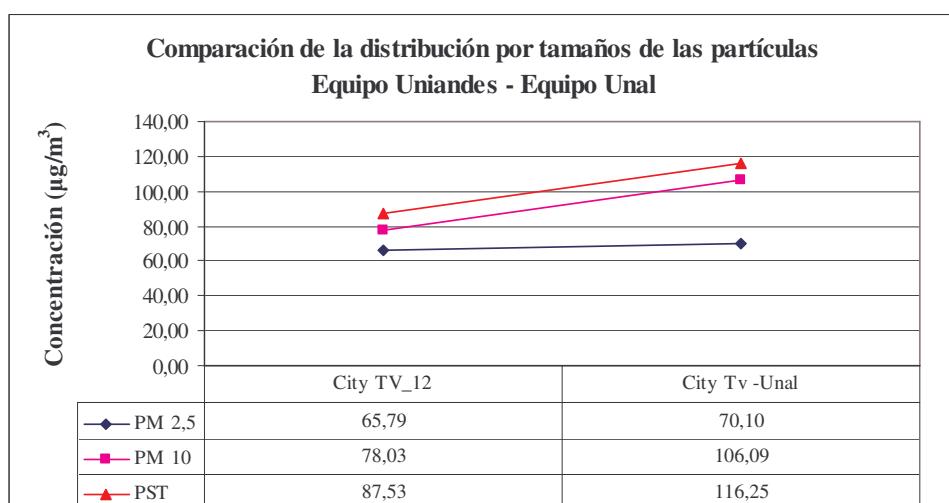


Tomado y adaptado de: Aforos Secretaría de Transito de Bogotá. 2004

Ahora bien si se comparan los resultados obtenidos entre el equipo de la universidad de las Andes y el de la Nacional, es posible determinar que, para las partículas con diámetro igual

a $2.5\mu\text{m}$ la diferencia es de tan solo del 6%. Sin embargo se presentan grandes discrepancias en los resultados a medida que aumenta el tamaño de la partícula, por ejemplo para PM_{10} , el resultado obtenido con el equipo de los Andes (figura 41) es 25% menor que el registrado por el equipo de la Nacional, de igual manera, para las PST la diferencia es del 25%. Se encuentra entonces, una diferencia porcentualmente equivalente entre las mediciones de los dos equipos para PM_{10} y PST, por esto es necesario llevar a cabo una revisión y un posterior ajuste en las etapas que recolectan las partículas de mayor tamaño. De otra parte, es importante en futuras campañas que involucren el uso de los equipos, diseñar metodologías que permitan la calibración de las bombas empleadas.

Figura 41. Comparación de la distribución por tamaños de las partículas Equipo Uniandes – Equipo Unal³⁹



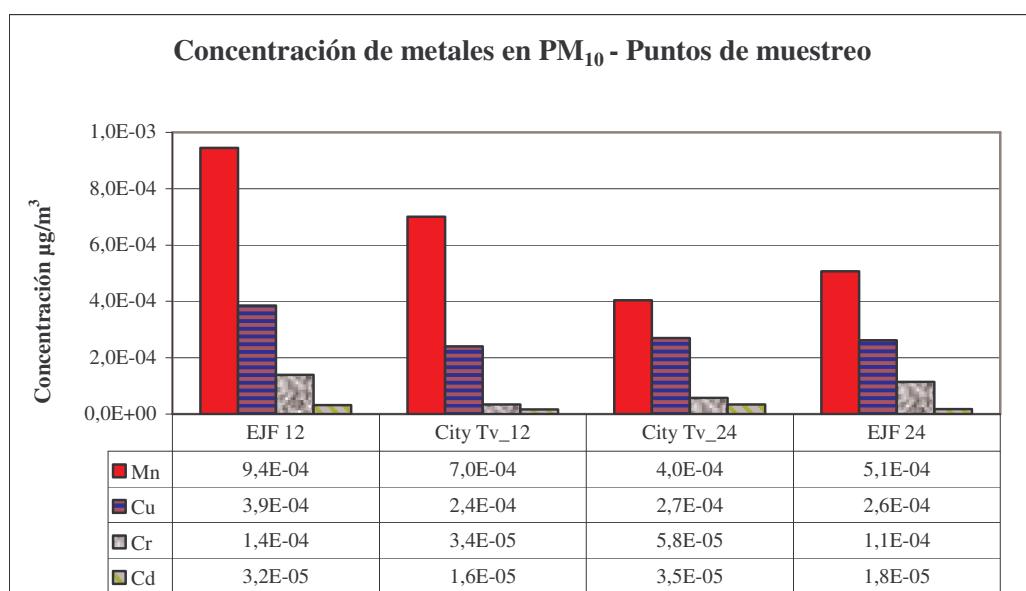
En cuanto a los resultados de los análisis de metales, se logró determinar que se presenta, en las muestras analizadas, mayor concentración de manganeso, seguido de cobre y cadmio. La presencia de cromo solo fue detectada en el punto sobre la calle 19. En el periodo de muestreo de 12 horas tanto la concentración de Mn como de Cu fue mayor sobre

³⁹ Datos suministrados por Vilma Palma dentro de su tesis de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Ambiental “Distribución de Tamaño de Partículas Respirables en Áreas Afectadas por Tráfico Vehicular”. Los muestreos fueron realizados para períodos de 12 horas.

la 19 que la Jiménez, esto ocurrió tanto en las partículas con d_{50} igual a 0.4 μm como 2.5 μm . Sin embargo, se detectó mayor concentración en el punto sobre la Jiménez, para los muestreos de 24 horas en las partículas con diámetro equivalente igual a 2.5 μm . De igual manera para este tamaño de partícula el cadmio se detectó en niveles muy bajos para el punto City Tv ($6.1*10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.4*10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$), el punto EJF no arrojó ningún resultado.

Sumando los valores obtenidos en la sección 5.1, para las partículas con diámetro equivalente igual a 0.4 μm y 2.5 μm , se obtiene la concentración de los metales en PM_{10} , de acuerdo a esto, la figura 42, presenta los resultados para este tipo de partículas, Aquí es posible observar que, el Mn es el metal de mayor concentración, presentando una disminución entre el muestreo de 12 y 24 horas, lo mismo ocurre con el Cadmio.

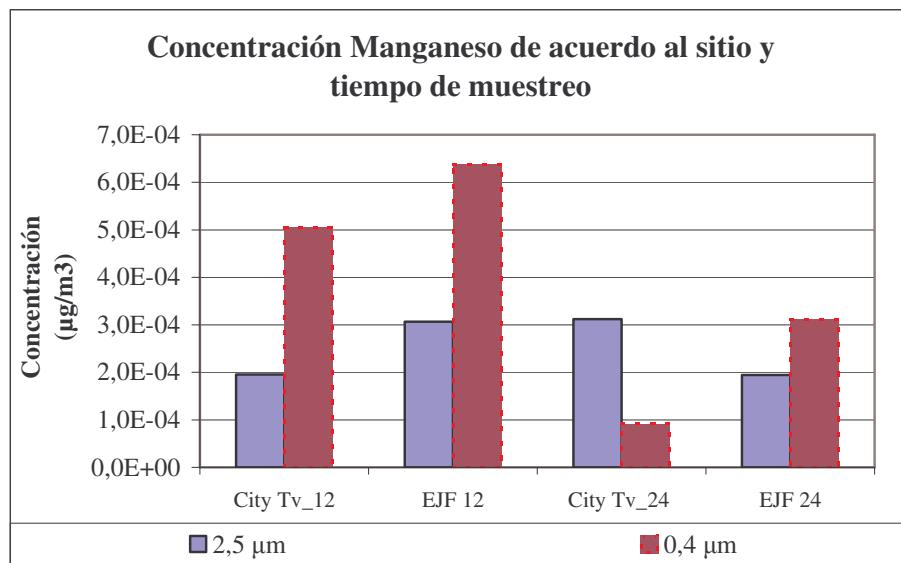
**Figura 42. Concentración de metales en PM_{10} – Puntos de muestreo
Terraza City Tv y EJF**



En el caso específico del Mn, se determinó que para el muestreo de 12 horas, las partículas de menor tamaño ($d_{50}=0.4\mu\text{m}$), presentan mayores concentraciones de este metal en su composición que las de 2.5 μm . En el caso de la avenida Jiménez la concentración de Mn es

2.5 veces mayor en las partículas pequeñas y 2.1 en la calle 19. Por el contrario, para el corredor de la Jiménez, en los períodos de 24 horas, se presenta que la concentración en las partículas de mayor tamaño es 3 veces la de la detectada en partículas con d_{50} igual a $0.4\mu\text{m}$ (ver figura 43).

Figura 43. Concentración de Manganese de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo



Tal y como se mencionó en la sección 5.1, la mayoría de las partículas emitidas por los motores diesel se encuentran entre 0.02 y $0.5\mu\text{m}$, lo cual soporta el hecho que la concentración reportada de Mn en partículas más pequeñas se relaciona directamente con las emisiones de los vehículos que transitan por los corredores de la calle 19 y de la avenida Jiménez. Esto explica la disminución de la concentración para los dos puntos de muestreo en períodos de 24 horas, es decir, en la noche como no existe un alto flujo de vehículos no se presenta una mayor presencia de Mn, en las muestras, dado que el volumen de muestreo aumenta y el aporte en peso de partículas y del metal continua siendo constante (solo en horas del día), por ende disminuye su concentración.

El Consejo de investigación nacional de Canadá, en el año de 1988 reportó que las concentraciones de Mn en el aire se encontraban⁴⁰ entre 0.5 y 14 ng/m³ en áreas rurales y en promedio alcanzaban los 40 ng/m³. En su estudio Espinosa⁴¹, encontró que la concentración de Mn en el corredor de Transmilenio era de 7.47 ng/m³ y en el corredor de la séptima de 0.33 ng/m³. Los valores encontrados en este estudio se ubican por debajo de los dos anteriores, siendo para el corredor de la Jiménez de $7*10^{-4}$ µg/m³ (0.7 ng/m³) y para la calle 19 de $9.4*10^{-4}$ µg/m³ (0.94 ng/m³) (ver figura 46). En ninguno de los casos de supera la norma establecida por la OSHA (Occupational Safety and Health) de 5 µg/m³, para ambientes laborales en un turno de 8 horas al día.

Para las partículas con d_{50} igual a 2.5 µm, se aprecia un incremento de 1.5 veces en la concentración de Mn para el muestreo de 24 horas sobre el de 12, caso contrario ocurre en el punto EJF, donde el material recolectado en 24 horas disminuye su concentración en 0.67 con respecto al recolectado en 12 horas. El incremento en el punto ubicado sobre la Jiménez, evidencia lo planteado anteriormente acerca de la resuspensión de las partículas en este punto, dado que investigaciones como las de Samara y Voutsas⁴² han encontrado que el Mn también hace parte del polvo resuspendido.

En el caso del Cobre, la concentración es, al igual que el Mn, mayor para las partículas con un diámetro equivalente igual a 0.4 µm en períodos de 12 horas. Para el muestreo en 24 horas, tal y como se presenta en la figura 44, mientras el punto City Tv, presenta mayor concentración en las partículas de 2.5 µm y menor en las de 0.4 µm, en el punto sobre la calle 19, las partículas m de menor tamaño (0.4 µm) tienen mayor concentración de Cr que las grandes (2.5 µm). En el corredor de la Avenida Jiménez, se determinó que la concentración para 12 horas en el PM₁₀ fue de $2.4*10^{-4}$ µg/m³ y para 24 horas de $2.6*10^{-4}$

⁴⁰ World Health Organization. Manganese and its compounds: environmental aspects. Génova 2004.

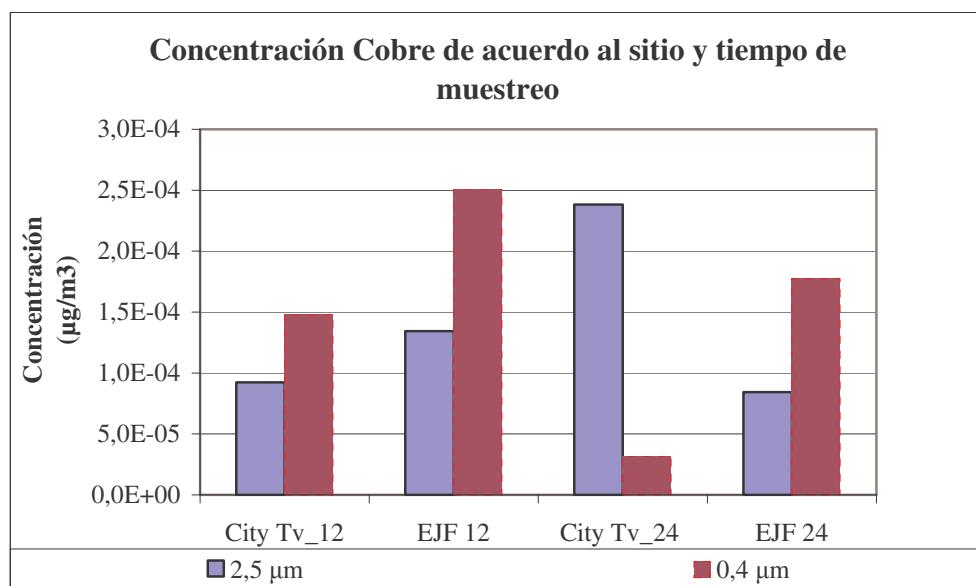
⁴¹ Espinosa M. Caracterización del material particulado en vías de transporte público colectivo y masivo en Bogotá. Universidad de los Andes, 2005.

⁴² Samara, C. & Voutsas, D. (2005). Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. Journal Chemosphere, 59.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, arrojando el mismo valor, lo cual indica que existe un aporte de este metal en la noche, soportando nuevamente la hipótesis de resuspensión en este corredor vial.

Aún no han sido determinados los efectos de la exposición humana a cantidades puntuales de cobre en el aire, sin embargo se ha establecido que la exposición de animales a bajos niveles de Cu en el aire, trae consigo efectos negativos sobre los pulmones de los mismos⁴³. En cuanto a la regulación OSHA ha establecido un límite de $1.0 \text{ mg}/\text{m}^3$ en ambientes laborales para un turno de 8 horas, El instituto NIOSH, recomienda una concentración límite de $0.1 \text{ mg}/\text{m}^3$. En este estudio el mayor valor detectado fue en el punto EJF_12 de $3.9*10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($3.7*10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Figura 44. Concentración de Cobre de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo

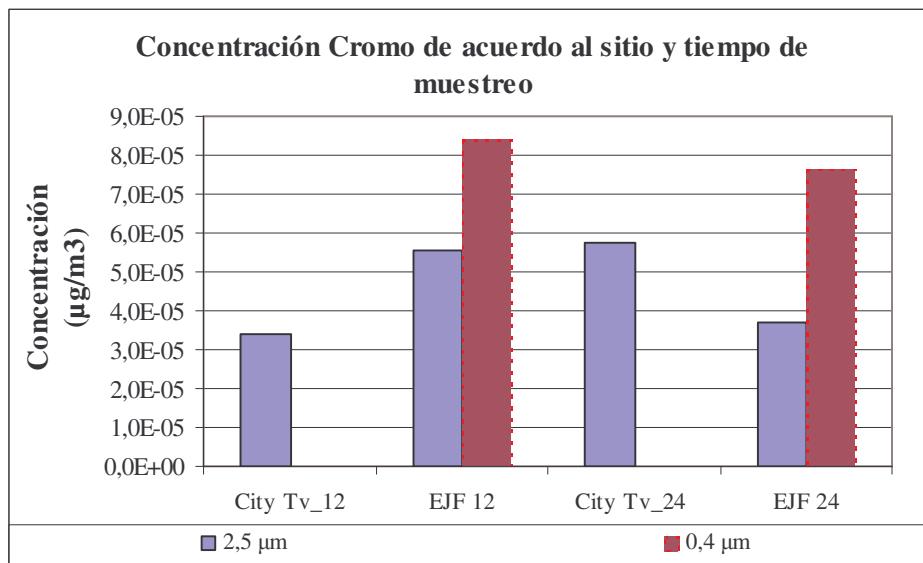


Dentro del análisis de espectroscopia por absorción atómica, se determinó la cantidad de Cr presente en las muestras recolectadas, de este análisis se logró observar que, en el punto ubicado sobre la Jiménez, la presencia de Cr en las partículas finas es cero para los dos

⁴³ COOPER. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Public Health Service. 1990

tiempos de muestreo, caso contrario ocurre con el ubicado en la calle 19, donde se presentan las mayores concentraciones de Cr, especialmente en el muestreo de 12 horas. Para las partículas de mayor tamaño ($d_{50}=2.5\mu\text{m}$), las concentraciones son mayores en EJF_12 y City Tv_24 (ver figura 45).

Figura 45. Concentración de Cromo de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo



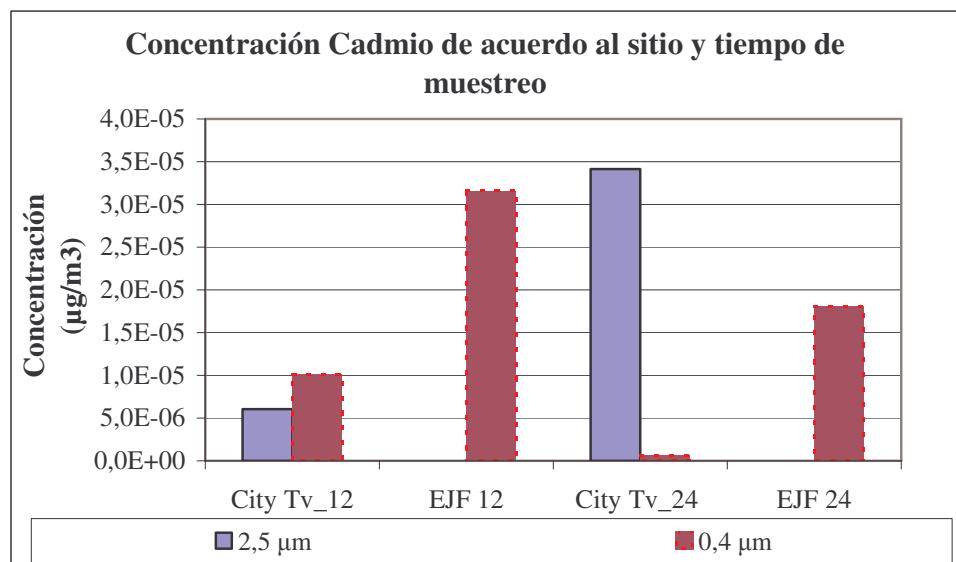
La USEPA ha estimado un límite máximo para el cromo en aire, que corresponde a $1.2*10^{-2} \text{ mg/m}^3$, sin embargo, estar expuesto a $8.3*10^{-5} \text{ mg/m}^3$ representa incrementar de uno en un millón el riesgo de cáncer⁴⁴. En los resultados obtenidos, para PM₁₀ de la figura 46, se tiene que para el punto de muestreo sobre la calle 19, la concentración de Cr, es relativamente la misma entre el muestreo de 12 horas ($1.4*10^{-4} \mu\text{g/m}^3$) y 24 horas ($1.1*10^{-4} \mu\text{g/m}^3$), siendo en ambos casos mayor que la registrada en el punto de la Avenida Jiménez; $3.4*10^{-5} \mu\text{g/m}^3$ para 24 horas y $5.8*10^{-5} \mu\text{g/m}^3$ para 24 horas.

⁴⁴ Toronto Public Health. Potential For Occupational and Environmental Exposure to Ten Carcinogens in Toronto. 2002.

Pese a que los niveles registrados de Cr son relativamente bajos, las normas en cuanto a su regulación en el aire no son completamente claras, en el numeral 3 se mencionó que La WHO ha determinado que el cromo es cancerígeno en seres humanos y que en el aire afecta los pulmones, se ha visto aquí que para la calle 19, las partículas finas son las que retienen mayor cantidad de este material, además la exposición es constante en las personas que trabajan por esta zona.

Por último se determinó la concentración de Cd en las muestras de aire para los dos corredores viales, de acuerdo con la figura 46, para el periodo de monitoreo de 12 horas, la mayor concentración de Cd en PM₁₀ se presenta en la calle 19 ($3.2 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo 2 veces mayor que la registrada en la avenida Jiménez ($1.6 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$). Para el monitoreo en 24 horas, se presenta una disminución del 43% en la calle 19 ($1.8 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$). En la Jiménez, por el contrario, la concentración se incrementa en 2.2 veces ($35 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Figura 46. Concentración de Cadmio de acuerdo al sitio y tiempo de muestreo



En la figura 46 se aprecia que existe una tendencia de la partículas finas ($d_{50}=0.4\mu\text{m}$) a retener mayor contenido de Cd, para periodos de muestreo de 12 horas, lo cual indica la presencia de este metal en las emisiones de los vehículos de transporte público, dada su

mayor actividad en el día. Es preciso mencionar que para la Jiménez, la concentración determinada en el período de 24 horas, es aportada por el metal retenido por las partículas con diámetro equivalente a 2.5 μm .

La USEPA ha identificado, basado en datos epidemiológicos humanos, un potencial cancerígeno en el Cd, de acuerdo a este organismo, es recomendable una concentración de $1.8*10^{-3}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, una exposición de $5.6*10^{-6}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ incrementa el riesgo de contraer cáncer de uno en un millón⁴⁵.

Si bien las concentraciones reportadas en este trabajo se encuentran por debajo de las mencionadas en el párrafo anterior, se encuentran evidencias que toma cerca de 30 años sea excretado del cuerpo. De otra parte, exposiciones elevadas de Cd ($5\text{mg}/\text{m}^3$), generan la destrucción de células epiteliales pulmonares, lo cual desencadena un edema pulmonar, traqueobronquitis, y neumonitis⁴⁶

De los resultados reportados se determinó que, la mayor cantidad de los metales se concentra en las partículas con diámetro equivalente igual a 0.4 μm , partículas estrechamente ligadas con los procesos de combustión de los motores Diesel, es decir, de acuerdo a este estudio, el Mn, Cu y Cd, se encuentran en el aire, siendo su agente emisor los vehículos de transporte público colectivo y masivo (en este caso Transmilenio). En el caso del Cr, éste solo se encontró al lado de la vía del transporte público colectivo, en mayor concentración para las partículas de menor tamaño, lo cual indica, que si bien no se encontró en la avenida Jiménez si aparece como un producto de la combustión característica para el parque automotor propio de la calle 19.

⁴⁵ Toronto Public Health. Potential For Occupational and Environmental Exposure to Ten Carcinogens in Toronto. 2002.

⁴⁶ ASTDR-Agency for Toxic Substances and Disease Register. 2001. División de toxicología ToxFAQ's. Atlanta, GA. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública

Figura 47. Distribución de la concentración por tamaño de partícula – Equipo Universidad Nacional⁴⁷



La figura 47 soporta el hecho que las emisiones de los motores diesel se caracterizan por emitir PM de menor diámetro, dado que para el corredor de la Jiménez, donde solo transitan los buses articulados de Transmilenio, se presenta un pico de concentración para partículas entre 0.43 y 1.0 micras. De igual manera, se sustenta la hipótesis acerca de la resuspensión de partículas en el corredor de la Jiménez, puesto que no existe flujo vehicular en esta zona en horas de la noche (ver tabla 18).

6.1. Conclusiones

- Para el periodo de monitoreo de 12 horas, la mayor concentración de PM_{2,5} se registró en el corredor de la calle 19 (92.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo 1.2 veces mayor que en el corredor de la avenida Jiménez (78.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Lo anterior es concordante con el proyecto adelantado por espinosa (2005), en el que se determinó una concentración de PM_{2,5} tres

⁴⁷ Datos suministrados por Vilma Palma dentro de su tesis de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Ambiental “Distribución de Tamaño de Partículas Respirables en Áreas Afectadas por Tráfico Vehicular”. Los muestreos fueron realizados para períodos de 12 horas.

veces mayor en el corredor de la carrera séptima (Sistema de Transporte Público Colectivo) que en el de la avenida Caracas (Sistema de Transporte Público Masivo)

- La diferencia en términos de concentración de $PM_{2.5}$, PM_{10} y PST, entre los dos ejes viales, para un periodo de monitoreo de 12 horas, es tan solo de un 18% en todos los casos, siendo mayor en la vía que emplea un Sistema de Transporte Público Colectivo (Calle 19). Este hecho pone en evidencia que la diferencia en términos de emisiones de PM entre los dos ejes viales no es altamente significativa, lo que indica que la inclusión de nuevas tecnologías en el control de emisiones vehiculares, como lo son los buses articulados, debe ir acompañada del mejoramiento del combustible Diesel, con el fin de lograr resultados mucho más óptimos.
- Con los datos que arrojó el monitoreo de 12 horas, se logró determinar que las mayores concentraciones de partículas se ubican en las que tienen un diámetro de corte de 0.4μ , en el caso específico del corredor de la Jiménez, donde solo transitan los buses articulados de Transmilenio, se evidenció un incremento en la concentración de las partículas entre $0.43\mu m$ y $1\mu m$, indicando que las emisiones de los motores diesel están caracterizadas por partículas de menor diámetro.
- Para la medición de 24 horas, se presentó un incremento, mayor al 50%, en la concentración de $PM_{2.5}$, PM_{10} y PST sobre el corredor de la Jiménez, con respecto al muestreo en 12 horas, lo cual induce a suponer que existen fuentes externas a las fuentes móviles que representan un aporte de material particulado significativo, también se sustentó este hecho en que dadas las condiciones atmosféricas del sitio el PM se resuspende en la noche lo cual incrementa su concentración, no obstante estas dos hipótesis no lograron comprobarse durante esta investigación y deben ser estudiadas en mayor profundidad en investigaciones ulteriores.

- El análisis de metales arrojó como resultado que la mayor concentración de Mn, Cu, Cd y Cr, se encuentran en la porción más fina de las muestras recolectadas, lo que indica que su agente emisor son los vehículos de transporte público colectivo y masivo
- Durante la medición de 12 horas, el Mn fue el metal de mayor concentración en el PM. Para el PM₁₀ éste fue 1.3 veces mayor en el corredor de la calle 19 ($9.4E^{-04}\mu\text{g}/\text{m}^3$) que en el corredor de la Jiménez ($7.0E^{-04}\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Del análisis de Cr, se logró determinar que, para los dos tiempos de muestreo (12 y 24 horas), la presencia de este metal en las partículas finas del corredor de la Jiménez fue cero. Reflejando una fuente externa a las fuentes móviles en el punto de la calle 19, dado que en este sitio la concentración solo disminuye en un 13% para el monitoreo de 24 horas con respecto al de 12.
- Los valores contemplados en la norma Colombiana para el control de los contaminantes atmosféricos son relativamente flexibles al compararlos con los estándares de otros países. Aunque para el Distrito Capital la norma es un poco más exigente, los valores adoptados en otras ciudades están de igual manera por debajo. Por consiguiente se debe continuar trabajando hacia la implementación de políticas ambientales, que estén lo suficientemente sustentadas con resultados científicos de metodologías normalizadas que obtengan cifras y permitan formular conclusiones lo más acertadas posibles con lo requerimientos del medio ambiente, con el fin de prevenir, controlar y mitigar el deterioro ambientales, por otra parte, deben preservar, administrar y conservar los recursos naturales de la ciudad de racionalmente, sin obstaculizar su progreso tecnológico y su desarrollo económico.

6.2 Sugerencias y Recomendaciones

- La reducción de las emisiones de PM a la atmósfera, de acuerdo a lo encontrado en este estudio, no son lo suficiente significativas en comparación con las encontradas en el corredor vial de la calle 19, por esto es necesario realizar un monitoreo en otras vías en las que se haya implementado el sistema Transmilenio, incrementando el número de muestreos en cada punto y la recolección de información climática y meteorológica in situ, es decir en el sitio específico y época del muestreo.
- Es necesario realizar un estudio concentrado exclusivamente en la medición de la concentración de metales en el PM, el cual cuente con un mayor número de muestreos y contemplando mediciones tanto para períodos de 12 horas en la mañana y en la noche, con especial énfasis en el corredor de la avenida Jiménez a la altura de la carrera séptima, debido a que, las concentraciones reportadas en este estudio para los metales, fueron relativamente bajas y a que aún no han sido determinados los efectos de la exposición humana a cantidades puntuales de los metales en el aire.
- Al comparar los resultados obtenidos con el Impactador de Uniandes con los de la Nacional, se presentó una diferencia significativa para las concentraciones de PM_{10} y PST, por esto se debe realizar una calibración al equipo de Uniandes, en cuanto al número y diámetro de agujeros para las etapas que recolectan partículas con un diámetro de corte mayor a $2.5 \mu m$, así mismo recalcular el numero de Reynolds y la caída de presión en estas etapas. De otra parte, la bomba de vacío Dosivac empleada, consta de un sistema de refrigeración a base de aceite, durante la campaña de medición se presentó evidencia de un posible escape de este sistema y posterior emisión de la bomba de aceite quemado, lo cual genera una instalación diferente del impactador para evitar la contaminación de la muestra. Por último, se requiere la calibración de la misma, dado que la bomba viene configurada de fábrica para flujos de aire mayores a los necesarios en el equipo.

7. REFERENCIAS

- Alcaldía Mayor. Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Recorriendo Santa Fe : diagnóstico físico y socioeconómico de las localidades de Bogotá, D.C. Bogotá, 2004.
- ASTDR-Agency for Toxic Substances and Disease Register. 2001. División de toxicología ToxFAQ's. Atlanta, GA. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- ASTDR-Agency for Toxic Substances and Disease Register. 2003. ToxFAQ's for Niquel. Available on line at: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts5.html>. Última visita Abril 22 de 2005.
- Banco Mundial, 1997. Contaminación atmosférica por vehículos automotores, experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina.
- Behrentz Eduardo. Memorias Foro – Taller Internacional de Calidad del aire. Conferencia “Calidad del aire en Bogotá D.C.” Bogotá Junio 5 y 6 de 2006
- Beltrán Daniel, Diseño y Construcción de un equipo para la Determinación de la Distribución de Tamaño de Material Particulado en el Aire por el Método de Impactación. Universidad de Los Andes, Bogotá 2004.
- CONPES-Departamento Nacional de Planeación Económica y Social., 2005. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire.}
- COOPER. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Public Health Service. 1990
- Espinosa, Mónica, Caracterización del Material Particulado en vías de Transporte Público Colectivo y Masivo en Bogotá., Universidad de los Andes, Bogotá 2005.
- Giraldo L, Behrentz E. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variable pertinentes. Universidad de los Andes, Bogotá 2005. Disponible en http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2006_primer_semestre/00006639.pdf
- Gutiérrez N. Los aceites vegetales como combustibles en los motores Diesel – Análisis de mezclas de aceite con alcohol y gasoil. Universidad de los Andes. Bogotá 2005. Disponible en http://biblioteca.uniandes.edu.co/Tesis_2005_segundo_semestre/00004831.pdf?

- Hinds William C. *Aerosol Technology. Properties, Behavior and Measurement of Airbone Particles*. Willey Intrscience, second edition, USA, 1998.
- Informe sobre el estado de los recursos naturales y del medio ambiente en Antioquia. Gobernación de Antioquia. 2002
- JICA. Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 1992. *The study on air pollution control plan in Bogotá city area*. Bogotá.
- “Jornada sin mi carro en Bogotá”. Red de Calidad del Aire. Alcaldía Mayor de Bogotá. DAMA. Tomado de: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/E/experien/expcol.htm>. Ultima visita Septiembre 8 de 2005
- Leguía., 2004. Sustancias peligrosas en partículas suspendidas totales en un área de influencia vehicular. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- Manahan, S. *Fundamentals of Environmental Chemistry*. New York: Lewis Publishers. 1993.
- NEVERS, Noel. *Air Pollution Control Engineering*. Second Edition, McGraw Hill. Singapore 2000
- National Environmental Technology Centre (1998) *Air pollutants: by source*, 1998: Social Trends 31. Recuperado el 20 de enero de 2005 de: <http://www.statistics.gov.uk/STATBASE/ssdataset.asp?vlnk=3641>
- Rae, Alan. (16 Dic. – 18 Dic. 2002) “E-Diesel: An Immediate & Practical Air Quality And Energy Security Solution” en: *Better Air Quality in Asian and Pacific Rim Cities* (BAQ 2002), Hong Kong, 53.1- 53.6.
- ROJAS, Néstor Y. Revisión de las Emisiones de material Particulado por la Combustión de Diesel y Biodiesel. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Noviembre de 2004.
- Rojas Nestor Y. *Memorias Curso Material Particulado: Industria y Transporte*. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de los Andes. Bogotá, 2005.
- Samara, C.& Voutsas, D. (2005). Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. *Journal Chemosphere*, 59.
- Seinfeld, John. *Air pollution: Physical and chemical Fundamentals*. USA: McGraw Hill. 1975.

- Serrano Rico, Influencia de la Condiciones de Carga de un Motor Diesel en la Generación y morfología de la Partículas de las Emisiones. Universidad de los Andes, Bogotá 2001.
- Solarte, I., 1999. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años. Trabajo de grado, Estudio contratado por el DAMA, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Toronto Public Health. Potential For Occupational and Environmental Exposure to Ten Carcinogens in Toronto. 2002.
- U.S. Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/ebtpages/air.html>. Última visita Septiembre 2 de 2005.
- World Health Organization. Manganese and its compounds: environmental aspects. Génova 2004.
- http://www.transmilenio.gov.co/transmilenio/frameset_buscador.asp. Última visita Julio 15 de 2006
- <http://www.statistics.gov.uk/> STATBASE/ssdataset.asp?vlnk=3641. Última visita Septiembre 2 de 2005
- http://europa.eu.int/eur-lex/en/lif/reg/en_register_1510.html. Última visita Septiembre 2 de 2005
- <http://www.aqmd.gov/smog/AirQualityData.html>. Última visita Septiembre 2 de 2005.

ANEXOS

Anexo 1. Normas de Calidad del Aire para el La Unión Europea⁴⁸

Pollutant	Regulation	Limit Values $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Reference period and other conditions	Protection of	Obligation
Sulphur Dioxide	Provision of the Federal Committee (FVZP)	60	annual average concentration	human health	Limit
		150	daily average concentration 95th percentile	human health	Limit
		540	average half-hour concentration 95th percentile	human health	Limit
		250	arithmetic sum of daily concentration of SO ₂ and particulate matter	human health	Limit
		80	median of daily mean values taken throughout the year where the median of daily mean values of matter taken throughout the year is $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$	human health	Limit
	EU Directive 80/779/EEC (as amended by 89/427/EEC) Annex IV	120	median of daily mean values taken throughout the year where the median of daily mean values of matter taken throughout the year is $\leq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$	human health	Limit
		130	median of daily mean values taken throughout the winter (1.10-31.3) where the median of daily mean values of matter taken throughout the year is $> 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$	human health	Limit
		250*	98th percentile of all daily mean values taken throughout the year where the 98th percentile of all daily values of matter taken throughout the year is $> 350 \mu\text{g}/\text{m}^3$	human health	limit
		350*	98th percentile of all daily mean values taken throughout the year where the 98th percentile of all daily mean values of matter taken throughout the year is $\leq 350 \mu\text{g}/\text{m}^3$	human health	limit
		40-60	arithmetic mean of daily mean values taken throughout the year	human health & the environment	recommended value
Particulate matter	Annex II	100-150	daily mean value	human health & the environment	recommended value
		50	annual concentration	human health	recommended value
		125	daily concentration	human health	recommended value
		60	annual average concentration	human health	limit
	WHO	150	95th percentile of daily mean concentration	human health	limit
		500	95th percentile of average half-hour concentration	human health	limit
		150	annual arithmetic of daily means	human health	limit
		300	98th percentile of daily mean concentrations	human health	limit
		120	daily median	human health	limit

⁴⁸ Tomado y adaptado de: http://europa.eu.int/eur-lex/en/lif/reg/en_register_1510.html. Última visita Febrero 18 de 2006.

Anexo 1. Normas de Calidad del Aire para el La Unión Europea. (Cont...)

Pollutant	Regulation	Limit Values $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Reference period and other conditions	Protection of	Obligation
Nitrogen Oxide	Provision of the Federal Committee (FVZP)	80	annual average concentration	human health	limit
		100	95th percentile of daily mean concentration	human health	limit
		200	95th percentile of average half-hour concentration	human health	limit
	WHO	200	98th percentile calculated from the mean values per hour or period of less than an hour recorded throughout the year	human health	limit
		50	50th percentile calculated from the mean values per hour or period of less than an hour recorded throughout the year	human health & the environment	limit
		135	98th percentile calculated from the mean values per hour or period of less than an hour recorded throughout the year	human health & the environment	limit
	WHO	150	daily median	human health	recommended value
		400	one-hour median	human health	recommended value
		5000	95th percentile of daily mean concentration	human health	limit
Carbon Monoxide Lead in PM	Provision of the Federal Committee (FVZP)	10000	95th percentile of average half-hour concentration	human health	limit
		10000	8-hour median	human health	recommended value
		30000	one-hour median	human health	recommended value
	WHO	60000	half-hour median	human health	recommended value
		0.5	annual average concentration	human health	limit
		2.0	annual mean concentration	human health	limit
Cadmium in PM	EU Directive 82/884/EEC	0.5-1.0	annual concentration	human health	recommended value
		0.01	annual average concentration	human health	limit
	WHO	0.01-0.02	annual concentration	human health	tolerable levels in town zones
		0.001-0.005	annual concentration	human health	limits for rural regions
Ozone	Provision of the Federal Committee (FVZP)	160	annual 8-hour concentration	human health	limit
		110**	mean value over 8-hours	human health	limit
	WHO	65	mean value over 1-hour	vegetation	limit

Anexo 2. Procedimiento de Acondicionamiento de Filtros de Aire

1. ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE LOS FILTROS

Los filtros a ser utilizados son WHATMAN Glass Microfibre Filters, 934-AH. Cat. 1820055 55mm, o equivalentes. Los filtros deben ser almacenados en su caja original, en un lugar fresco y seco. Cualquier manipulación de los filtros debe ser llevada a cabo con pinzas metálicas o plásticas, preferiblemente sin ranuras y sin puntas que puedan perforar los filtros. Por ningún motivo los filtros deben ser tocados directamente con los dedos.

Para los filtros con muestras que tienen como objetivo análisis químico, los filtros deben ser almacenados a 4°C o menos después de su pesaje.

2. MARCA DE LOS FILTROS

Antes de acondicionar los filtros, debe decidirse el código de identificación para marcar los filtros, de acuerdo con el diseño de experimentos definido.

La marca de los filtros puede llevarse a cabo de dos maneras:

- a. Directa. Por el lado menos rugoso del filtro, marque el filtro con su código de identificación, usando un lápiz negro blando, cuya punta no debe estar afilada, para evitar perforar el filtro.
- b. Indirecta. Asigne y guarde cada filtro de muestreo en una caja Petri de vidrio (recomendado) o plástico (opcional). Marque la caja con el código de identificación del filtro, sea con marcador o *sticker*.

Incluya dentro del diseño experimental un filtro blanco por cada jornada o grupo de muestreo.

3. ACONDICIONAMIENTO DE LOS FILTROS

Prepare un desecador para el almacenamiento de los filtros, usando una solución o sílica gel que garantice una humedad constante de 30-40%, con una variación máxima de $\pm 5\%$. Almacene los filtros en el desecador, sea en un soporte que los mantenga separados uno de otro sin dar lugar a confusión en su identificación, o en sus cajas Petri semiabiertas, durante un periodo de 24 a 48 horas antes de su pesaje. Conserve el desecador en un cuarto a temperatura constante de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. La humedad NO debería ser menor al 30%.

Siga el procedimiento anterior tanto antes como después del muestreo de material particulado. Registre la temperatura y humedad del cuarto de acondicionamiento y/o del desecador en el cuaderno de laboratorio.

4. PESAJE DE LOS FILTROS

Después de acondicionar los filtros en el desecador, péselos en una balanza de alta precisión ($\pm 0.0001\text{g}$ o $\pm 0.00001\text{g}$) hasta peso constante, preferiblemente sin que demore más de 2 minutos en la estabilización. Registre el peso de cada filtro frente a su respectiva identificación en el cuaderno de laboratorio. La balanza debe estar nivelada, en una superficie limpia y libre de vibración, fuera del efecto de corrientes de aire y conectada a tierra para minimizar la estática. Debe permanecer siempre encendida. El desecador y la balanza deben permanecer en la misma habitación durante el acondicionamiento y el pesaje. El pesaje debe ser llevado a cabo en la misma balanza antes y después del muestreo, preferiblemente por el mismo analista.

Entre el pesaje y el muestreo, y entre el muestreo y el segundo pesaje, no deben pasar más de 10 días. Registre temperatura y humedad del momento de pesaje en el cuaderno de laboratorio.

5. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN LA EMISIÓN

Una vez se tengan los datos de pesaje de los filtros antes y después del muestreo, determine el peso del material particulado por diferencia de los pesos y registre frente a la identificación del filtro correspondiente. Calcule el volumen de gas filtrado multiplicando el flujo leído en el flujómetro por el tiempo de muestreo y registre el resultado. Para reportar los resultados en condiciones estándar, corrija el volumen por presión y temperatura. Determine la concentración de material particulado dividiendo la diferencia de peso del filtro, convertido a microgramos (μg) entre el volumen de gas filtrado, y registre.

Referencias relacionadas

FILTER CONDITIONING AND WEIGHING FACILITIES AND PROCEDURES FOR PM REFERENCE AND CLASS I EQUIVALENT METHODS 2.5.
<http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/pm25/qa/balance.pdf>

**Anexo 3. Resultados en el pesaje de los filtros empleados en los puntos City TV_12 –
City TV_24 y EJF_12 – EJF_24**

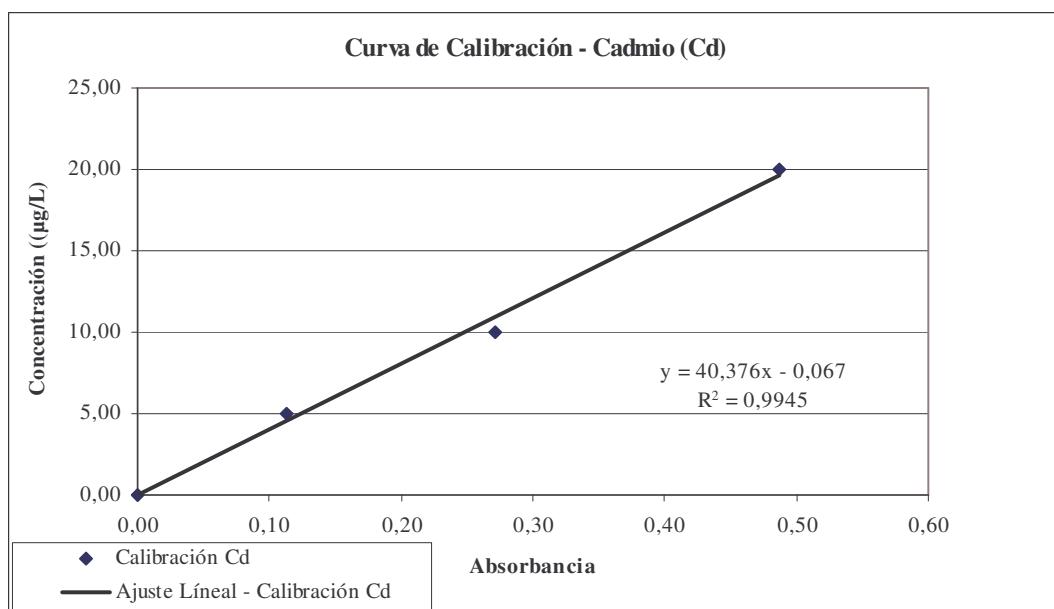
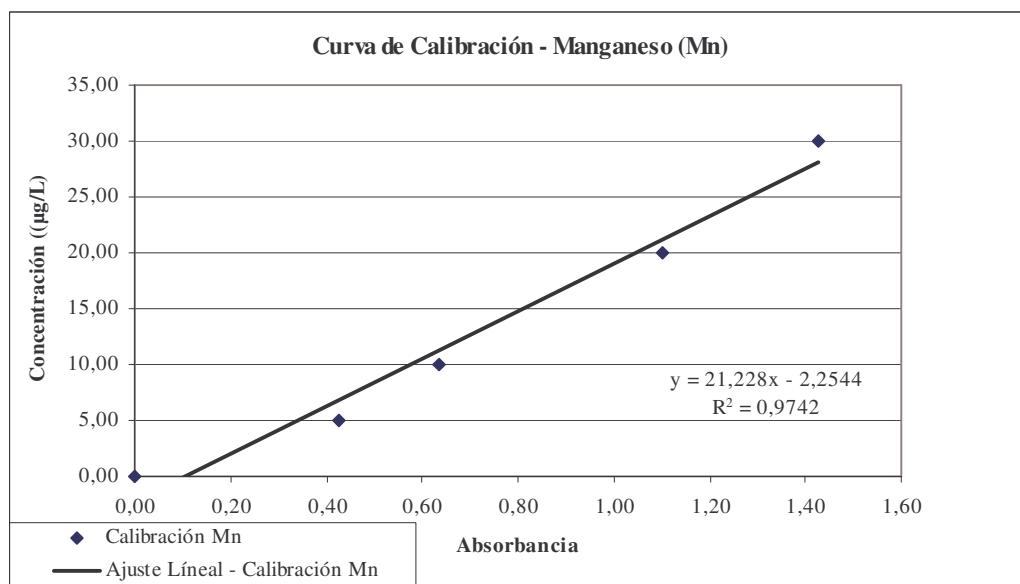
FECHA: 22/04/2006		HORA: 3:00PM			FECHA: 05/05/2006		HORA: 5:20 PM		LUGAR: CITY TV I	
FILT		PESO INCIAL (mg)			PESO FINAL (mg)			COMENTARIOS		
0	126,77	126,8	126,83							
1	125,57	125,57								
2	124,22	124,19	124,21	124,21						
3	126,16	126,18	126,16							
4	126,31	126,32	126,31		127,03	127,04	127,05		Etapa 1 - Impactador ($d_{50}=19 \mu\text{m}$)	
5	125,57	125,58	125,57		127,31	127,29	127,32	127,3	Etapa 5 - Impactador ($d_{50}=2.5 \mu\text{m}$)	
6	125,87	125,88	125,86	125,88	126,49	126,49	126,49		Etapa 2 - Impactador ($d_{50}=9 \mu\text{m}$)	
7	333,35	333,34	333,35		342,64	342,68	342,65	342,65	Etapa 8 - Impactador ($d_{50}=0.4 \mu\text{m}$)	

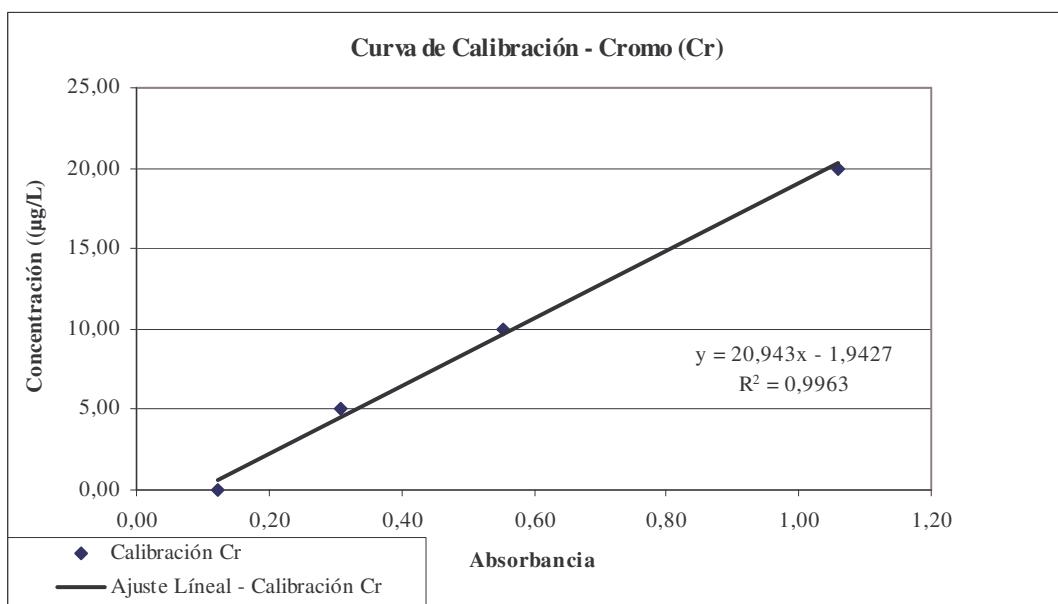
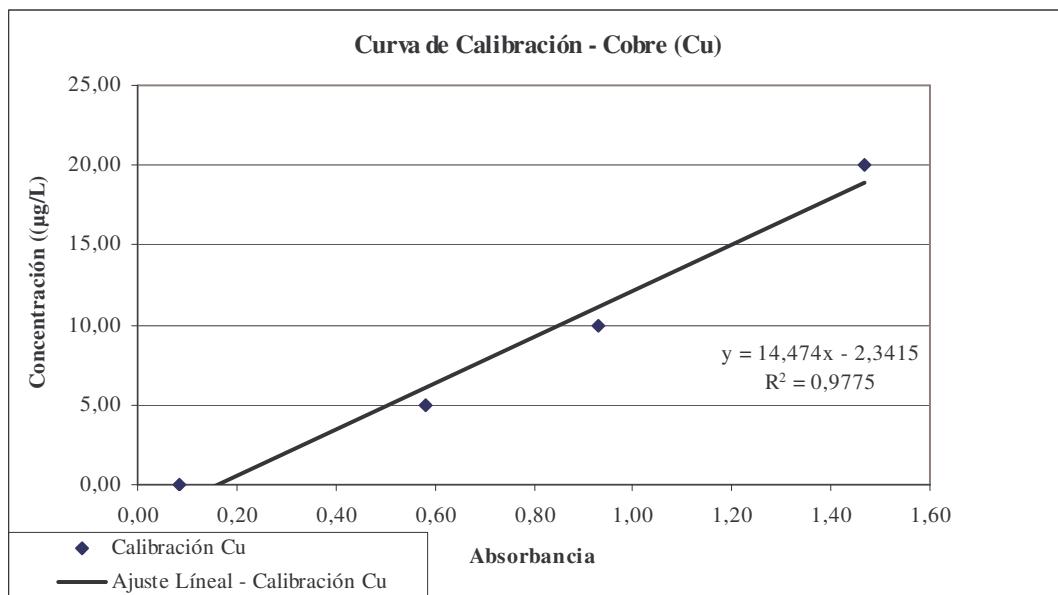
FECHA: 03/09/2006				HORA: 10:40AM		FECHA: 20/03/2006				HORA:		LUGAR: CITY TV II	
FILT		PESO INCIAL (mg)		PESO FINAL (mg)						COMENTARIOS			
0	124,88	124,88	124,88		125,92	125,91	125,91	125,91		Etapa 1 - Impactador ($d_{50}=19 \mu\text{m}$)			
1	123,88	123,88	123,88		125,06	125,07	125,09	125,09		Etapa 2 - Impactador ($d_{50}=9 \mu\text{m}$)			
2	124,29	124,31	124,29		125,59	126,58	126,58	126,59		Etapa 5 - Impactador ($d_{50}=2.5 \mu\text{m}$)			
3	125,28	125,29	125,28										
4	125,7	125,71	125,7										
5	335,82	335,82	335,8	335,8	369,7	369,74	369,76	369,74		Etapa 8 - Impactador ($d_{50}=0.4 \mu\text{m}$)			

FECHA: 06/05/2006				HORA: 3:30pm		FECHA: 16/05/2006				HORA: 5.15PM		LUGAR: EJF II	
FILT		PESO INCIAL (mg)		PESO FINAL (mg)						COMENTARIOS			
0	126,15	126,15	126,16		127,10	127,11	127,10	127,11		Etapa 1 - Impactador ($d_{50}=19 \mu\text{m}$)			
1	125,34	125,34	125,34										
2	124,47	124,50	124,47										
3	124,02	124,01	124,02		124,91	124,91	124,93	124,93		Etapa 2 - Impactador ($d_{50}=9 \mu\text{m}$)			
4	125,71	125,74	125,75	125,76	127,91	127,93	127,94	127,93		Etapa 5 - Impactador ($d_{50}=2.5 \mu\text{m}$)			
5	335,57	335,57	335,58		375,25	375,27	375,28	375,27		Etapa 8 - Impactador ($d_{50}=0.4 \mu\text{m}$)			

FECHA: 14/05/2006				HORA: 4:00PM		FECHA: 24/05/2006				HORA: 4:15PM		LUGAR: EJF I	
FILT		PESO INCIAL (mg)		PESO FINAL (mg)						COMENTARIOS			
0	125,75	125,76	125,74	125,75	126,34	126,35	126,34	126,37		Etapa 1 - Impactador ($d_{50}=19 \mu\text{m}$)			
1	124,09	124,09	124,1										
2	125,25	125,26	125,26	125,26	126,05	126,05	126,05	126,05		Etapa 2 - Impactador ($d_{50}=9 \mu\text{m}$)			
3	126,1	126,1	126,09										
4	124,19	124,22	124,22	124,22									
5	124,56	124,56	124,56										
6	126,2	126,19	126,21	126,21	128,21	128,23	128,23	128,23		Etapa 5 - Impactador ($d_{50}=2.5 \mu\text{m}$)			
7	333,14	333,14	333,13	333,14	344,25	344,2	344,23	344,23		Etapa 8 - Impactador ($d_{50}=0.4 \mu\text{m}$)			

Anexo 4. Curvas de calibración del Espectrómetro M-Series de los laboratorios de Ingeniería Química de la Universidad Nacional





Anexo 5. Resultados análisis de Metales

Manganeso

Muestra	Abs	Concentración muestra ($\mu\text{g/L}$)	Concentración Total ($\mu\text{g/L}$)	Concentración ($\mu\text{g/m}^3$)
Blanco	0,00	0,00	0,00	
Estándar 1	0,43	5,00	5,00	
Estándar 2	0,64	10,00	10,00	
Estándar 3	1,10	20,00	20,00	
Estándar 4	1,43	30,00	30,00	
City Tv 24_2,5 μm	1,49	33,53	1,19	3,1E-04
City Tv 24_0,4 μm	0,70	14,21	0,35	9,2E-05
City Tv 12_0,4 μm	1,31	29,18	0,96	5,1E-04
EJF 12_2,5 μm	0,89	18,76	0,58	3,1E-04
EJF 12_0,4 μm	1,57	35,37	1,21	6,4E-04
EJF 24_2,5 μm	1,05	22,60	0,74	1,9E-04
EJF 24_0,4 μm	1,54	34,69	1,19	3,1E-04
City Tv 12_2,5 μm	0,68	13,60	0,37	2,0E-04
Blanco_Etapa_2_5	0,31	4,50	0,00	0,0E+00
Blanco_Etapa 8	0,35	5,70	0,00	0,0E+00

Cadmio

Muestra	Abs	Concentración muestra ($\mu\text{g/L}$)	Concentración Total ($\mu\text{g/L}$)	Concentración ($\mu\text{g/m}^3$)
Blanco	0,00	0,00	0,00	
Estándar 1	0,11	5,00	5,00	
Estándar 2	0,27	10,00	10,00	
Estándar 3	0,49	20,00	20,00	
City Tv 24_0,9 μm	0,16	6,23	0,13	3,4E-05
City Tv 24_0,4 μm	0,01	0,51	0,00	6,6E-07
City Tv 12_0,4 μm	0,03	1,18	0,02	1,0E-05
EJF 12_0,9 μm	0,01	0,34	0,00	0,0E+00
EJF 12_0,4 μm	0,07	2,83	0,06	3,2E-05
EJF 24_0,9 μm	0,02	0,54	0,00	0,0E+00
EJF 24_0,4 μm	0,08	3,18	0,07	1,8E-05
City Tv 12_0,9 μm	0,02	0,87	0,01	6,1E-06
Blanco_Etapa_2_5	0,03	0,99	0,00	0,0E+00
Blanco_Etapa 8	0,01	0,41	0,00	0,0E+00

Cobre

Muestra	Abs	Concentración muestra ($\mu\text{g/L}$)	Concentración Total ($\mu\text{g/L}$)	Concentración ($\mu\text{g/m}^3$)
Blanco	0,08	0,00	0,00	
Estándar 1	0,58	5,00	5,00	
Estándar 2	0,93	10,00	10,00	
Estándar 3	1,47	20,00	20,00	
City Tv 24_0.9 μm	1,07	43,31	0,91	2,4E-04
City Tv 24_0.4 μm	0,45	18,07	0,12	3,2E-05
City Tv 12_0.4 μm	0,61	24,55	0,28	1,5E-04
EJF 12_0.9 μm	0,42	17,05	0,26	1,3E-04
EJF 12_0.4 μm	0,81	32,45	0,48	2,5E-04
EJF 24_0.9 μm	0,49	19,69	0,32	8,4E-05
EJF 24_0.4 μm	1,00	40,42	0,67	1,8E-04
City Tv 12_0.9 μm	0,34	13,83	0,18	9,2E-05
Blanco_Etapa_2_5	0,17	6,74	0,00	0,0E+00
Blanco_Etapa 8	0,33	13,19	0,00	0,0E+00

Cromo

Muestra	Abs	Concentración muestra ($\mu\text{g/L}$)	Concentración Total ($\mu\text{g/L}$)	Concentración ($\mu\text{g/m}^3$)
Blanco	0,12	0,00	0,00	
Estándar 1	0,31	5,00	5,00	
Estándar 2	0,55	10,00	10,00	
Estándar 3	1,06	20,00	20,00	
City Tv 24_0.9 μm	0,44	7,35	0,22	5,8E-05
City Tv 24_0.4 μm	0,19	2,04	0,00	0,0E+00
City Tv 12_0.4 μm	0,38	6,06	0,00	0,0E+00
EJF 12_0.9 μm	0,33	4,97	0,11	5,5E-05
EJF 12_0.4 μm	0,61	10,83	0,16	8,4E-05
EJF 24_0.9 μm	0,37	5,71	0,14	3,7E-05
EJF 24_0.4 μm	0,74	13,58	0,29	7,7E-05
City Tv 12_0.9 μm	0,29	4,12	0,06	3,4E-05
Blanco_Etapa_2_5	0,22	2,76	0,00	0,0E+00
Blanco_Etapa 8	0,45	7,48	0,00	0,0E+00