

Consideraciones del material particulado en bogotá. Alternativas tecnológicas de medición de la calidad del aire

Considerations of the particulate material in bogotá. Technological alternatives for measuring air quality

HUGO ARMANDO CÁRDENAS FRANCO

Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, en los programas curriculares en Electricidad. Estudios: Ingeniería Eléctrica, en la Universidad Nacional de Colombia, Cartografía, ITC de Holanda, maestría en Meteorología en la Universidad Nacional, en curso. Integrante del Grupo de Investigación en Energías Alternativas de la Universidad Distrital – GIEAUD. Correo electrónico: hacardenasf@udistrital.edu.co

Clasificación del artículo: Reflexión (conciencias)

Fecha de recepción: 6 de octubre de 2009

Fecha de aceptación: 28 de enero de 2010

Palabras clave: aire, calidad, material particulado, medición, tecnología.

Keywords: air quality, particulate matter, measurement, technology.

RESUMEN

Se presenta un análisis de la problemática ambiental de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá, con base en investigaciones recientes del comportamiento del Material Particulado de 10 μm ó menos de diámetro - MP10, considerando su dispersión a partir de fuentes contaminantes fijas, denominadas chimeneas, así como con respecto a su concentración en las distintas localidades de Bogotá, dadas las influencias meteorológicas, en particular, el comportamiento de los vientos. De otro lado, se recalca la incidencia que tienen las emisiones de las fuentes móviles en la salud. Se presentan además, de manera amplia y generalizada, las alternativas tecnológicas para medición y caracterización de variables ambientales y se redondea el estudio con un diseño particular para medir MP10.

ABSTRACT

An analysis is presented concerning the environmental problem of air quality in the city of Bogotá, based on recent research about the behaviour of the Particulate Material of 10 μm or less in diameter - PM10, considering its dispersion from fixed sources of pollution, called stacks, as well as in regard to its concentration in the different localities of Bogotá, given meteorological influences, particularly, the winds behaviour. On the other hand, emphasis is done in respect to the incidence that emissions from mobile sources cause in health. Besides, in a general manner, the technological alternatives for measuring and characterizing environmental variables are presented, and a feedback for the study is done through a particular design for measuring PM10.

1. Introducción

El material particulado se ha constituido en un problema crítico, dado el impacto directo que genera en las condiciones de salud de la población, en particular en lo referente a las Enfermedades Respiratorias Agudas (ERA), así como en afecciones cardíacas. Por otro lado, también tiene un impacto negativo en cuanto a visibilidad, olores e higiene. Su origen en Bogotá es debido, principalmente, a las fuentes tanto de tipo móvil, como de tipo fijo. Estas últimas se emplean en el presente estudio para mostrar cómo una investigación formal permite inferir, a partir de lo informativo, cualitativo y causal, un diagnóstico crítico y cuantitativo, de la magnitud que representa esta problemática ambiental.

Con respecto a las fuentes móviles la contaminación, está dada, principalmente, por la mala calidad del Aceite Combustible Para Motores (ACPM) que emplea el parque automotor Diesel de transporte público, así como el de transporte de carga, con un total aproximado de 20.000 vehículos en Bogotá, por lo anterior el contenido de azufre ya pasó altos valores: 1200 partes por millón – ppm en el primer semestre del 2008 en el momento de esta investigación, esta cifra es de sólo 500 ppm, mientras que para el resto del país sigue siendo de aproximadamente 4200 ppm. No obstante, Bogotá es la ciudad más contaminada del país, dada su alta densidad vehicular. Esto contrasta con otras metrópolis del mundo, por ejemplo Ciudad de México, que pasó de un nivel de 800 ppm en el pasado, a 50 ppm actualmente, y que aspira en 2009 a estar en un nivel de 15 ppm solamente.

Para el caso de las fuente fijas, que cuando proceden de industrias, se denominan chimeneas, producen MP10 en función del tipo de combustible (líquido o sólido), la cantidad y tasa de empleo, así como de la implementación en mayor o menor grado de dispositivos de amortiguamiento a la atmósfera, tal como el empleo de filtros a la salida de las respectivas chimeneas.

La relación entre los anteriores valores, contemplando los dos tipos de fuentes, y los niveles de concentración de MP10 ha sido establecida por la Organización Mundial de la Salud – OMS,

que recomienda un valor máximo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP10; sin embargo para Colombia este valor se ha dejado en $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que es superado ampliamente en varias localidades de la ciudad; por ejemplo, para la zona del Tunal,(2008), este valor es de $106,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, de acuerdo con el Informe Medio Anual sobre Estado del Medio Ambiente, del IDEAM.

Esta problemática afecta seriamente la salud de poblaciones más vulnerables a este material particulado, en especial a niños y a ancianos; según la Secretaria Distrital de Salud (SDS), en 2007, fallecieron por ERA, entre enero y agosto, 92 niños. Para ese mismo año, se reporta en [1]: “10 mil menores de 5 años de Puente Aranda, Kennedy y Fontibón se enfermaron con gripes y bronquitis, de 31.000 niños que en ese año resultaron afectados en la ciudad”.

Una reflexión al respecto es el preocupante desconocimiento del fenómeno tanto físico, de cómo hacen presencia en el organismo este tipo de sustancias, como químico, en cuanto a qué patología se asocia con distinto tipo de sustancias en el organismo humano, lo cual se evidencia en lo asombroso que resulta el hecho de que sean, en muchos casos, los vehículos que transportan a los mismos niños, los que muestran un pésimo estado, tanto de sus gases de emisión en sus procesos de combustión, como de emisiones evaporativas del combustible mismo, con pobres o ausentes sistemas de ventilación, lo que agudiza el problema de tipo respiratorio en pequeños infantes que pasan tiempos suficientes en estos vehículos y, en consecuencia se ven afectados por las condiciones deficientes de algunos de estos vehículos. Por otro lado, los adultos (principalmente las madres de los niños) no se percatan de que en muchos automotores, el tubo de escape está a una altura similar a la de las fosas nasales de los infantes, y dado el empuje con que vienen los gases de emisión del vehículo, pueden ingresar fácilmente hacia las vías respiratorias de ellos. Guardar ciertas distancias, inclusive usar mascarillas de protección, así como exigir un control especial con respecto a los gases de emisión de los vehículos que transportan niños, mitigaría en buena medida la necesidad de asistencia hospitalaria a infantes por enfermedades respiratorias.

Lo anterior amerita que se impulsen campañas y se tomen medidas que reduzcan ese impacto tan lamentable, lo cual se debe sustentar en un tratamiento riguroso del tema, que identifique relaciones causa efecto, y que recomiende soluciones apropiadas.

2. Material particulado emitido por fuentes fijas

Como muestra de una adecuada metodología que contribuya al entendimiento de la problemática ambiental planteada, esta parte del escrito se refiere a la contaminación proveniente de fuentes fijas y recopila la estrategia del empleo de un modelo numérico, similar a los empleados en meteorología, que a partir de sus pronósticos de concentración de contaminante PM10, sirve de entrada a modelos que simulan la dispersión emitida por chimeneas o fuentes fijas de tipo industrial, tal como se muestra en [2].

La zona escogida para este análisis corresponde a Bogotá, tratada a partir de sus distintas localidades, y específicamente descrita a partir de dos sistemas coordinados: el planimétrico y el SINU (Sistema de Información de Norma Urbana), relacionados los dos por un corrimiento de +100.000 metros al primero, para obtener las coordenadas en el segundo sistema.

Para fuentes fijas industriales, se empleó el Industrial Source Complex Model Short Term ISCST-3, en abril y agosto, el cual es un modelo para el cálculo de dispersión. Aquí se debe hacer la observación de que la concentración del MP10 se mide en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por cuanto su estacionamiento es en $\mu\text{g}/\text{m}^2$.

Para el pronóstico meteorológico se empleó el ampliamente conocido modelo MM5. Sin embargo, la ejecución de este modelo tuvo limitaciones, en particular, en lo concerniente al uso de esquemas de parametrización, lo que no permitió acertar al mejor pronóstico climatológico.

En la metodología empleada se saca provecho de la interrelación entre la dispersión obtenida por el

ISCST-3 y, en particular, la dirección y la velocidad de los vientos, que modela el MM5, pues éstos son los que transportan material particulado desde la fuente, con lo que se cierra un esquema que permite establecer las concentraciones de MP10 en distintos puntos de la ciudad.

Los datos con que se trabajó fueron obtenidos del inventario de fuentes fijas del antiguo Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA), hoy día Secretaria del Medio Ambiente, de la información meteorológica del IDEAM, y de estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire para Bogotá (RMCAB) del entonces DAMA. Estos datos se describen con mayor precisión a continuación.

Para los datos de concentración horaria de MP10 se tuvo acceso a los registros de la RMCAB de las estaciones que se nombran a continuación: Sony, Hospital Olaya, Cazuca, Santo Tomás, CADE, Merk, El Bosque, Ministerio del Medio Ambiente, y Fontibón. No obstante en 2001, se contaba con las catorce estaciones de la RMCAB para el monitoreo tanto de calidad del aire, como de variable meteorológicas que registraban: contenido de Partículas Suspendidas Totales (*PST, SO₂, CO*), MP10 y oxidantes, como el Ozono, así como otros elementos que tienen impacto en el cambio global del clima, en contaminación y nuevamente en la salud, tales como *CH₄*, Compuestos Volátiles Orgánicos (COV), Benceno (sustancia altamente tóxica), Tolueno y Formaldehído (cancerígeno). Las variables meteorológicas consideradas fueron: radiación solar, temperatura superficial, velocidad y dirección de viento, nubosidad, precipitación, altura de mezcla y estabilidad atmosférica.

En cuanto a las fuentes de emisión, a partir de 4.490 establecimientos con 9.400 equipos, se seleccionaron 220 equipos que más consumen combustibles líquidos y sólidos.

Con respecto a las fuentes seleccionadas, [2] (Anexo I), se codificaron 110 que utilizan combustibles líquidos como: ACPM, crudo, crudo rurales, crudo civiano TT2 y fuel oil, entre otros.

Similarmente se codificaron 72 fuentes que emplean combustibles sólidos, [2] - (Anexo J), tales

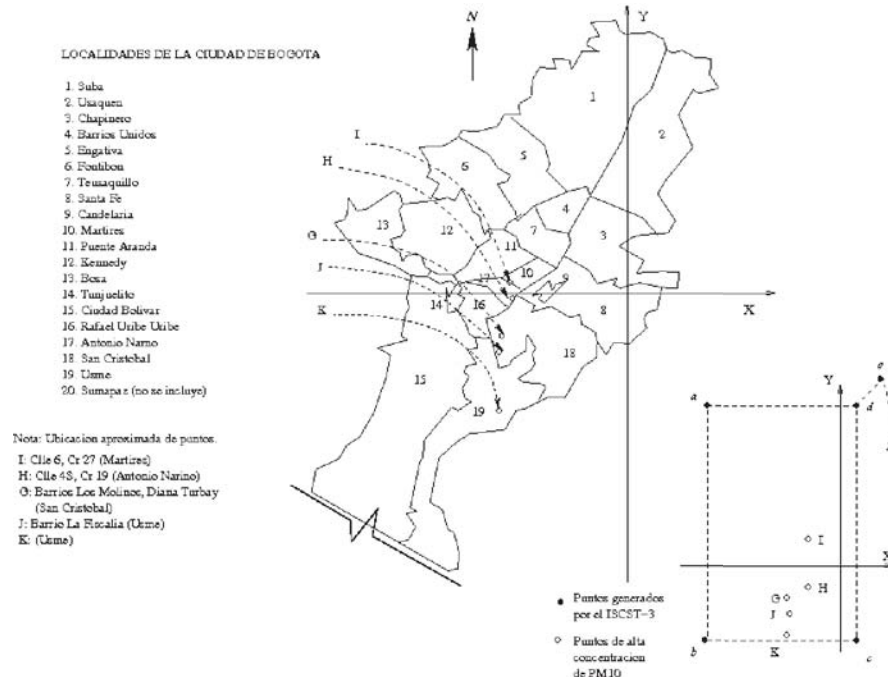


Figura 1. Planigrama con puntos notorios de la concentración promedio de PM10 para Bogotá, 2002.

como carbón, coque y mineral, carbon mineral, coque, leña y aserrín, entre otros.

Usando el modelo ISCST-3, [2] (Anexo Q), llego a unos resultados de Condiciones Promedio de Concentraciones de MP10, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para Bogotá, con una resolución tanto a lo ancho (X) como a lo largo (Y) de 1500 m; estos resultados están relacionados posicionalmente con el planigrama mostrado en la figura 1, en la cual se aprecia que el modelo ISCST-3 generó una cuadrícula entre

los puntos *a*, *b*, *c* y *d*, en tanto que se notan dos receptores discretos en *e* y *f*; (letras minúsculas). Los puntos *G*, *H*, *I*, *J*, y *K* de la Figura 1 muestran los más altos valores en el escenario de altas concentraciones; (letras mayúsculas).

Las coordenadas para los puntos mostrados en la figura 1, así como los valores de las respectivas concentraciones de PM10 se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas y valores promedio de PM10 de puntos destacados del planigrama para Bogotá

punto	X planimétrica [m]	Y planimétrica [m]	X S.I.N.U. [m]	Y S.I.N.U. [m]	PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
a	-11000	17500	89000	117500	1.2
b	-11000	-8000	89000	92000	0.4
c	1000	-8000	101000	92000	2.1
d	1000	17500	101000	117500	3.8
e	3950	21200	103950	121200	3.0
f	5228	12678	105228	112678	0.5
G	-3500	-5000	96500	95000	21.3
H	-2000	-500	98000	99500	26.8
I	-2000	1000	98000	101000	29.9
J	-3500	-6500	96500	93500	42.9
K	-3500	-8000	96500	92000	64.0

De la figura 1 y de la tabla 1, se nota que el área modelada corresponde a un área de 30.600 hectáreas, es decir, 306 kilómetros cuadrados. Ahora

bien, la situación en 2008, refleja que se mantiene la tendencia mostrada en esta metodología de análisis.

Tabla 2. Cualitativos generales de concentración promedio de MP10 en Bogotá, 2002

Zona o Localidades	Concentración promedio de MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Cualificación
Nororiente de la ciudad	30 a 40	Baja concentración
Fontibón, Puente Aranda, Kennedy	100 a 110*	Alta concentración

* compárese con las normas nacional e internacional de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

La aplicación de estrategia sustentada en los modelos empleados, aplicada a los datos considerados como los más relevantes, muestran que la distribución espacial promedio de la concentración de MP10 en Bogotá se puede resumir globalmente como se indica en la tabla 2.

Esta relación tabular se relaciona geográficamente con la “Densidad de consumo de combustibles líquidos por localidad”, [2] (figura. 38), se evidencia que donde hay una alta densidad de este tipo de combustibles, entre 1001 a 6000 gal/(ha-año), cual es el caso de Fontibón, Puente Aranda, Kennedy, también allí se registran altas concentraciones de MP10.

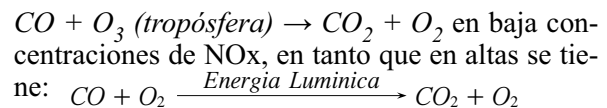
Similarmente se observa geográficamente la “Densidad de consumo de combustibles sólidos por localidad”, [2] (figura. 38), se indica que las localidades de Ciudad Bolívar, Uribe, San Cristóbal y Usme con alta densidad de este tipo de combustibles, entre 1,00 y 15,00 Ton/(ha-año), también registran altas concentraciones de MP10.

3. Tecnológicas de medición de contaminación ambiental

En este aparte se hace referencia a aspectos químicos y toxicológicos de los contaminantes ambientales y se centra en los distintos tipos de equipos que se emplean para la determinación de la calidad de aire. Lo anterior está encaminado a motivar el

establecimiento de la infraestructura tecnológica interdisciplinaria, necesaria para afrontar apropiadamente esta problemática ambiental, y en particular para impulsar el desarrollo que debe recibir la tecnología química, asociada inherentemente con el tratamiento de la problemática ambiental.

Antes de contabilizar las distintas alternativas de estimación de contaminantes químicos en la atmósfera, es importante tener en cuenta que muchos de estos contaminantes primarios en presencia de la radiación solar, en particular por la radiación ultravioleta tienen una frecuencia arriba de los 10^{16} Hz, producen contaminantes secundarios en la forma de radicales libres en la tropósfera y hacia la estratósfera. Estos radicales tienen la propiedad de reaccionar fácilmente con otros elementos, así se generan los contaminantes secundarios. A manera ilustrativa, algunos contaminantes primarios como CO , NO_2 , O_3 , SO_2 material particulado, metales como el plomo, y los compuestos volátiles orgánicos – VOC’s, se pueden dar lugar a compuestos secundarios; por decir algo, a partir del , en concentración bien sea baja o alta de óxidos de nitrógeno, NOx, produce:



lo importante aquí con respecto al ozono O_3 es que este elemento es vital en las capas atmosféricas donde protege de la mortífera radiación ultra-

violeta, pero en superficie, es un contaminante que afecta las vías respiratorias y que tiene distintos gestores, como los arcos eléctricos o la operación de una simple fotocopiadora. Otro caso, se considera los hidrocarburos como el metano, provenientes tanto de las fuentes móviles como de la industria: $CH_4 + O_2 \rightarrow CH_2O$ (formaldehído) + H_2O muestra lo serio que resulta que este tipo de emisiones superen un umbral de seguridad, dado que como se indicó antes, el formaldehído, así como el benceno (hidrocarburo aromático - C_6H_6), son agentes cancerígenos. Las formas de ingreso al organismo humano pueden ser por ingestión, por las vías respiratorias, o a través de la piel (vía dérmica). Un tratamiento especial a estos aspectos toxicológicos se encuentra en la referencia [3].

Yendo a las alternativas y aportes tecnológicos de medición, en [4] se da cuenta de una completa reseña de investigaciones que se han desarrollado en Bogotá, en particular, para la localidad de Puente Aranda, con base en datos de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire para Bogotá (RMCAB). También allí da cuenta que las estaciones Merck,

Fontibón y Cazucá, donde se excedió solamente durante el 2000, en más de 400 veces la norma nacional para 24 horas en cuanto a PM10. No obstante lo alarmante de estos registros, se debe tener en cuenta que por simple integridad de los equipos de las estaciones de medición, éstos no necesariamente se encuentran a la altura y distancias más apropiadas de las fuentes móviles de emisión por medir. Ahora bien, aunque básicamente se tiene la misma infraestructura de la red medición para Bogotá, sí avances notables en el establecimiento y en el fortalecimiento de entidades y grupos de investigación, que tanto a nivel local como nacional, socializan sus resultados globalmente, lo cual contribuye a una mejor toma de decisiones en distintos niveles, para mitigar esta problemática ambiental.

Con respecto a las consideraciones del componente tecnológico, se tienen como referencia los métodos avalados por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), [5], como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Métodos de medición de sustancias contaminantes

Sustancia	Técnica o Principio de Medición
Ozono - O_3	Absorción Ultravioleta
Monóxido de Carbono - CO	Absorción Infrarroja; filtros (NDIR)
SO_2	Método colorímetro
NO_2, NO y NO_x	Luminiscencia Química
$MP10$	Gravimetría

Fuente: <URL:<http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/met/draft-volume-4.pdf>>

Para un adecuado monitoreo se debe disponer, como ha sido lo tradicional, de estaciones de calidad del aire o meteorológicas, en número y posiciones apropiadas.

Con respecto a los métodos y equipos para la medición de la calidad del aire, se cuenta con documentación completa sobre los sistemas de medi-

ción en [6], con base en los siguientes criterios: (a) según la masa de las partículas; (b) según el número de las partículas; (c) según el área superficial de las partículas; (d) a partir del análisis químico del material particulado. De acuerdo con estas alternativas de medición, se puede tener una lista de instrumentos en dichas modalidades, como se indica a continuación:

3.1. **Medición basada en la masa de las partículas**

3.1.1. **Filtros de impactadores manuales:**

en este tipo de dispositivos, la concentración másica se lleva a cabo mediante la diferencia entre la masa del filtro antes y después del muestreo. Algunos de los instrumentos basados en este tipo de filtros, son:

3.1.1.1. **High vol TSP, Thermo Andersen.**

La denominación “High vol” corresponde a Alto Caudal, mientras que TSP (total suspended particles) hace referencia a Partículas Suspendidas Totales – PST; se emplea la filtración de todas éstas, las cuales son muestreadas en el aerosol bajo prueba, sin llevar a cabo una etapa previa de impactación. Aplicación: Aire ambiente. Muestreo típico: veinticuatro horas

3.1.1.2. **High vol PM10, Thermo Andersen.**

En la etapa de impactación permite el estacionamiento de partículas mayores a 10 micrómetros. Filtración: partículas de 0 a 10 micrómetros. Esta técnica se toma como ejemplo de diseño en la tercera parte de este escrito. Aplicación: aire ambiente. Muestreo típico: veinticuatro horas

3.1.1.3. **High vol PM2.5, Thermo Andersen.**

Impactación: partículas mayores a 2.5 micrómetros. Filtración: partículas de 0 a 2.5 micrómetros. Aplicación: aire ambiente. Muestreo típico: veinticuatro horas

3.1.2. **Técnicas automáticas**

Éstas son:

3.1.2.1. **Beta Attenuation Monitor**

(BAM, monitor de atenuación de radiación beta). Es un método equivalente para medir PM10, según la EPA.

3.1.2.2. **Tapered Element Oscillating Microbalance**

(TEOM, microbalanza de elemento oscilante)

3.1.2.3. **Sensores de cristal piezoeléctrico.**

No ha sido designado por la EPA como un método equivalente; el mantenimiento es mucho más frecuente comparado con otras técnicas.

3.1.3. **Opacímetros**

Se basan en las interacciones de las partículas con la luz. La opacidad es la característica de limitar el paso de la luz; el opacímetro se puede calibrar para que determinado porcentaje de opacidad corresponda a cierta concentración másica de partículas.

Aplicación: se emplea ampliamente en la determinación de emisiones de vehículos (fuentes móviles).

3.2. **Medición basada en el número de las partículas**

En esta denominación se incluyen instrumentos que también pueden discriminar el tamaño de éstas, una característica importante en el estudio y clasificación del material particulado.

3.2.1. **Condensation Nuclei Counter – CNC**

(contador de núcleos de condensación) Emplea detección óptica a través de una celda fotosensible; requiere un acondicionamiento previo del aerosol que va a ser evaluado y debe transitar por algunas fases de los fluidos (saturación, sobresaturación, condensación); es un dispositivo complejo por involucrar distintos fenómenos y disciplinas, pero es bastante preciso. Aplicación: aire ambiente y emisiones vehiculares.

3.2.2. **Electrical Low-Pressure Impactor – ELPI**

(impactador eléctrico de baja presión) Es un dispositivo que a través del efecto corona carga las partículas eléctricamente; combina esta técnica con la impactación; al darse esta última la carga adquirida genera una corriente que puede ser medida; con un proceso de calibración de esta medida se obtiene el número de partículas y además su tamaño. Es uno de los instrumentos de medición

más versátiles y útiles, dada su operación basada en fenómenos eléctricos, los cuales, por ende permiten el seguimiento de eventos variables en el tiempo. Aplicaciones: mediciones discriminadas de emisiones vehiculares (aceleración, desaceleración, arranque, emisiones continuas).

3.2.3. Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Analizador de movilidad diferencial por barrido. Inicialmente, carga la partículas eléctricamente usando un cargador bipolar; la carga adquirida está relacionada con el tamaño de cada partícula, de manera que si se hace circular este haz de partículas en flujo laminar a través de un campo eléctrico, se tendrá una dispersión de éstas que permite el registro de los distintos tamaños de partículas contenidas en el aerosol. Este dispositivo emplea un CNC (contador de núcleos de condensación) para su conteo y determinación de su concentración. Dado el principio de operación basado en un campo eléctrico, la variación de éste, cambiando el voltaje que lo genera, permite una discriminación de partículas entre 0.007 y 1 micrómetro, en un tiempo que va de los 2 a los 20 minutos. Resulta como se ve un instrumento versátil pero complejo, pues en su operación incluye un CNC.

3.2.4. Fast Mobility Analyzer (FMA)

Analizador rápido de movilidad. Como el instrumento anterior, usa una combinación de ese mismo instrumento, el SMPS, con el ELPI. Esto permite que la desventaja de rapidez de operación del SMPS se vea superada a partir de la rapidez del ELPI.

3.3. Medición basada en el área superficial de las partículas.

Tiene aplicación en el campo de la toxicología, en la cual se ha visto que hay relaciones de asociación entre células como las alveolares y partículas con gran área superficial por unidad de masa.

3.3.1. El epifaniómetro.

Permite determinar el área superficial de Fuchs (de las partículas) con base en procedimientos

físico-químicos.

3.4. Análisis químico.

Para obviar la determinación directa de las emisiones de las distintas fuentes, se debe hacer un análisis de la composición química del material particulado. Por lo tanto, además de los métodos e instrumentos antes descritos para establecer la concentración y tamaño de las partículas, se requiere el análisis químico de su composición, cuyo resultado ayuda a inferir el tipo de fuente emisora, así como estimar el potencial de riesgo a nivel toxicológico. A continuación se nombran algunas sustancias importantes por determinar.

3.4.1. Fracción Orgánica Soluble - SOF

Es una técnica conocida como la de “carbono volatizable” que permite la determinación de compuestos orgánicos de varios hidrocarburos provenientes de procesos de combustión.

3.4.2. Carbono no volatizable

Permite la determinación de carbono no orgánico o elemental.

3.4.3. Metales

Interesa la determinación de plomo, níquel, zinc, cobre, vanadio, hierro y silicio principalmente.

3.4.4. Cloruros, nitratos y sulfatos

Formados por nucleación o condensación, asociados con irritación de las células alveolares.

3.4.5. Agua

Puede indicar la presencia de ciertos compuestos (cloruros, nitratos, sulfatos y otros iónicos) que son higroscópicos.

Las técnicas de muestreo pueden requerir de horas o incluso de días. Para el caso de la SOF se emplea la técnica conocida como “Extracción Soxhlet” que requiere de un equipo de extracción para la determinación de solvente orgánico bien sea ciclohexano o isopropanol. El tiempo de muestreo es de 18 horas y tiene altos requerimientos de agua para refrigeración, así como de suministro de energía.

4. Caso: muestreador “high-volume” para material particulado

A continuación se hace la descripción, el diseño, característica, instrumentación y forma de uso del instrumento y técnica antes referidos como “High-volume” o Alto Caudal, para la estimación de la concentración de distintas sustancias en el aire, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con particular interés para el denominado material particulado de tamaño menor a $10\ \mu\text{m}$ de diámetro – MP10 (o PM10, por sus siglas en inglés). El diseño básico del muestreador “High-vol” se observa en la figura 2, la cual es una representación básica, particular de éste, que permite

visualizar el proceso de medición. Se ingresa el aire que va a ser analizado a través de una entrada selectiva de tamaño, que en la figura 2 es del tipo techo, pero que puede ser de otras configuraciones como la de flujo opuesto, la de flujo ciclónico o la de impactador en cascada como se ilustra en [7]. Seguidamente el aire pasa a través de un filtro de $20,3 \times 25,4\ \text{cm}$, a una tasa de flujo de $1132\ \text{L}/\text{min}$. Se recolectan en el filtro las partículas cuyo tamaño sea menor que el de la entrada selectiva.

La masa se determina pesando el filtro antes y después de la recolección, haciendo de esta manera la diferencia que es del orden de los μg , como corresponde a un método gravimétrico.

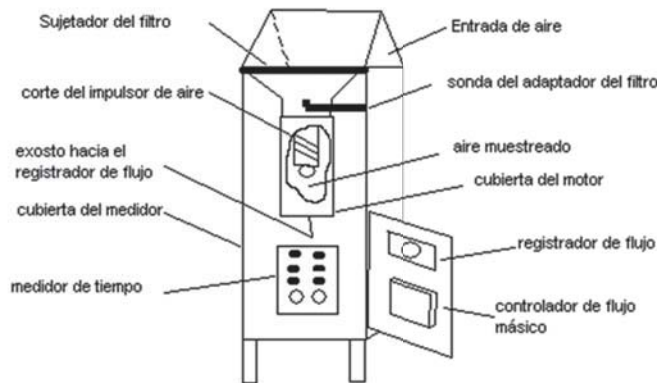


Figura 2. Muestreador “High-volume” para estimar material particulado

La concentración de las distintas sustancias, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se determina dividiendo el peso ganado por el filtro, en μg , por el volumen de aire muestreado, en m^3 .

Esta técnica se puede usar para determinar partículas suspendidas totales, y en particular cumple los estándares requeridos para determinar las partículas en el rango de 0 a $10\ \mu\text{m}$, denominadas PM10.

Si se dispone de filtros especiales, las muestras pueden revelar contenidos de plomo, iones, carbono orgánico y elemental, material orgánico extraí-

ble, diversos elementos, material radiactivo, componentes inorgánicos y partículas individuales.

Midiendo la presión del aire muestreado en el exosto por medio de una carta registradora de flujo, o de una galga de presión, se puede encontrar el flujo de aire a través del filtro.

El anterior control manual de flujo consta de un transformador de voltaje variable conectado en serie con el motor del ventilador, lo cual permite controlar su velocidad, de forma que la tasa de flujo pueda ser ajustada al valor deseado para la resistencia (mecánica) del filtro utilizado. En un motor de inducción este tipo de control de veloci-

dad se puede lograr en virtud a que el torque desarrollado por el motor es proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, de manera que los cambios en velocidad, de aumento o de reducción, se pueden lograr, si se aumenta o disminuye el voltaje aplicado. Sin embargo existen otras formas de controlar la velocidad de un motor de inducción tales como el control por frecuencia, el cambio del número de polos en el estator y la inyección de una fuerza electromotriz en el circuito del rotor; [8].

Diversas organizaciones internacionalmente reconocidas entre las que sobresale la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency – EPA, por sus siglas en inglés) han emitido procedimientos estándares de operación para este tipo de equipos ¹, las cuales ofrecen e implementan en Colombia empresas como Bio Solutions Ltda, y K2 Ingeniería.²

4.1 Rango de medición y sensibilidad.

El límite inferior cuantificable corresponde a la mínima cantidad que puede detectar el instrumento. Para un muestreo recomendado de 24 horas a un flujo de 1132 L/min, éste límite, que depende de la resolución en la lectura de diferencias de pesos en el filtro (antes y después del muestreo), debe corresponder a una desviación estándar $\sigma = \pm 2 \text{ mg}$. Asociando este valor con el estadístico denominado 3σ , este límite inferior se puede cuantificar en el rango de 3,5 a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El límite superior cuantificable para las mismas condiciones de muestreo está en el rango de 400 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.2 Calibración y equipos de auditoría.

- Estándar primario para la tasa de flujo. Para

1 U.S. Environmental Protection Agency, 1988: "Quality assurance handbook for air pollution measurement systems: Volumen II: Ambient air specific methods." EPA-600/4-77-027a. Research Triangle Park, NC.
2 ver: www.biosolutionsltda.com y www.k2ingenieria.com respectivamente.

este estándar, se puede emplear un dispositivo de desplazamiento positivo de volumen, un espirómetro u otro dispositivo similar. Este estándar permite verificar las mediciones de flujo que hace el aparato.

- Estándar para el orificio de transferencia. Este orificio de calibración tiene un diámetro de 3,175 cm (1,25 pulgadas) y va en un cilindro cuya cavidad tiene un diámetro de 7,2 cm, (3 pulgadas),³ y un largo de 20,3 cm, (8 pulgadas). Este orificio se monta firmemente con el soporte de fijación del filtro, en el lugar de la toma de aire durante la calibración. Lateralmente al cilindro y partiendo de el mismo, se puede medir la caída de presión a través del orificio, la cual para el flujo de 1132 L/min puede ser del orden de algunas pulgadas de agua. La relación entre la diferencia de presión y la tasa de flujo se establece con la ayuda de la curva de calibración sacada de medidas del estándar primario, a presiones y temperatura estándar.
- Se introducen resistencias de flujo que simulan resistencias del filtro; éstas se introducen al final del calibrador en el punto opuesto al del orificio, por medio de una apertura variable o usando un conjunto de discos circulares perforados.
- Manómetro: se emplea una galga de presión calibrada o un manómetro de agua en el rango de 0 a 15 pulgadas de agua (0 a 4 kPa), a fin de determinar la caída de presión a través del orificio.
- Barómetro: con sus mediciones se hacen correcciones en la tasa de flujo si hay diferencias mayores a 4 kPa en la presión atmosférica al momento de hacer la calibración y cuando se hacen las medidas operativas.
- Termómetro: se hacen correcciones por esta

3 Se incluyen medidas en el sistema inglés, dado que tienden a quedar en números cerrados, provenientes del diseño inicial, y por lo tanto de una más fácil referencia.

variable si las diferencias son de más de 15°C que corresponde al 5% del estándar de 298 K.

Q_2 = Tasa de flujo corregida por presión y temperatura, [m³/min]

4.3. Filtros.

Se usa una membrana o fibra de 20,3 x 25,4 cm, (8 x 10 pulgadas), para recolectar las partículas. La escogencia del tipo de filtro depende de aspectos como su estabilidad mecánica, su estabilidad química y de la eficiencia de muestreo de las partículas. Los principales tipos son: fibra de celulosa, fibra de vidrio, fibra de quartz, fibra de vidrio con recubrimiento de teflón y membrana de teflón.

5. Resultados

Los datos arrojados y ajustados de las mediciones permiten estimar los parámetros de interés. Se pueden usar las siguientes expresiones:

$$C = \left[\frac{M_f - M_i}{V} \right] \times 10^6 \quad (\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (1)$$

$$V = \left[\frac{Q_1 + Q_2}{2} \right] \times t \quad (\text{m}^3) \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_1 \left[\frac{T_2 \times P_1}{T_1 \times P_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}^3/\text{min}) \quad (3)$$

donde:

C = Concentración de masa del material particulado suspendido, [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

M_i = Peso del filtro en blanco, [g]

M_f = Peso del filtro expuesto al muestreo, [g]

P_1 = Presión atmosférica del estándar del orificio de calibración, [kPa]

P_2 = Presión atmosférica durante la calibración del muestreo, [kPa]

T_1 = Temperatura absoluta aplicable a la calibración del estándar del orificio de calibración, [K]

T_2 = Temperatura absoluta durante la calibración del muestreo, [K]

t = Tiempo de muestreo, [min]

Q_1 = Tasa de flujo durante la calibración del muestreo, [m³/min]

6. Conclusiones y recomendaciones

Se vio que los puntos *I, H, G, J, y K* de la figura 1 y relacionados en la tabla 1, muestran los más altos valores en el escenario de altas concentraciones; sin embargo por estas zonas, correspondientes a El Porvenir, Yomasa y Usme no se tienen a la fecha estaciones de registro, lo cual amerita que en dichas inmediaciones se fortalezca la infraestructura de medición.

Del análisis se evidencia que las localidades de Fontibón, Puente Aranda y Kennedy, donde se tiene una alta densidad de consumo de combustibles líquidos, se registran altas concentraciones de MP10.

También se concluye algo similar para las localidades de Ciudad Bolívar, Uribe, San Cristóbal y Usme, en las cuales dada la alta densidad de consumo de combustibles sólidos, se registran altas concentraciones de MP10.

Las localidades más afectadas también son pobres en zonas verdes y arbolado público, que de existir apropiadamente, actuarían como barreras naturales para contener de alguna manera este nocivo material particulado.

Se cuenta con un amplio soporte tecnológico para una adecuada utilización del medidor de Alto Volumen – High Volume, con lo que se ve fortalecido el campo de la medición de distintos tipos de contaminantes que pudieran estar presentes en el aire.

El trabajo interdisciplinario de las tecnologías relacionadas con el entendimiento, caracterización y mitigación de la contaminación ambiental muestra la necesidad de fortalecer en nuestro medio la parte química. Todos estos aportes desde distintas perspectivas presentan una relación natural en el entorno meteorológico y desde este campo se debe propender a la utilización de modelos adecuados que permitan interpolar o extrapolar información a zonas definidas por la mejor resolución espacial

que permita la infraestructura de medición de variables.

Se hace necesario un plan de acción vanguardista

para minimizar el impacto que causa el MP10, a través de estrategias que prioricen el derecho a la salud y al bienestar colectivo, sobre los intereses individualistas.

Referencias.

- [1] “En Puente Aranda, 68% de las industrias contaminan. 752 fábricas generan graves problemas ambientales, según censo de Secretaría. 10 mil niños enfermos por la polución”. En : El Tiempo, Bogotá : (5 de sep de 2008); p. (1) 22.
- [2] H. Benavides, *Pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá*. Bogotá, 2003, 260 p. Tesis de grado (M.Sc. en Meteorología). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias.
- [3] M.C.Vallejo, C.Baena. *Toxicología ambiental. Efectos de los contaminantes ambientales en la salud humana*. 2 ed. Grupo Empresarial Wills, Bogotá 2007.
- [4] L. Blanco. “*Caracterización microbiológica del material particulado como factor de riesgo sobre la salud en la localidad de Puente Aranda*”. En N. ROJAS. *Material particulado atmosférico y salud*. Ediciones Uniandes, Bogotá, 2005.
- [5] Environmental Protection Agency. “*Quality Assurance handbook for air pollution measurement systems*”. Volume IV: Meteorological measurements. Versión 1.0 (Draft). 2008, Disponible en : <URL:<http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/met/draft-volume-4.pdf>>
- [6] N. Rojas. “*Material particulado atmosférico y salud*”. En : *Generalidades sobre material particulado y su caracterización*. Ediciones Uniandes, 2005.
- [7] J.G. Watson, et ál. “*High-Volume measurement of size classified particulate matter*”. En: J. LODGE, editor. *Methods of air sampling and analysis*. Third Edition. Boca Raton : CRC Press LLC Lewis Publishers, 1988 .
- [8] B. Guru, H. Hizirglu. “*Electric machinery and transformers*”. Oxford University Press, New York, 1995.