



Revista Luna Azul

E-ISSN: 1909-2474

lesga@une.net.co

Universidad de Caldas

Colombia

ARCINIÉGAS SUÁREZ, CÉSAR AUGUSTO

DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10

Revista Luna Azul, núm. 34, enero-junio, 2012, pp. 195-213

Universidad de Caldas

Manizales, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321727348012>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

**DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO:
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM₁₀***

CÉSAR AUGUSTO ARCINIÉGAS SUÁREZ¹
cearsu@yahoo.es

Manizales, 2011-08-12 (Rev. 2011-11-30)

RESUMEN

El material particulado es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados en el mundo, este se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros, 1999), que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas.

La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz (Chen, Ying & Kleeman, 2009). Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos (Pope, 2004).

Es necesario, además de realizar mediciones de la concentración de este contaminante, evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo, asociándolo con los fenómenos meteorológicos, composición química y origen, los cuales permitan orientar estrategias de control y realizar seguimiento por parte de las autoridades ambientales interesadas.

Este artículo presenta una revisión bibliográfica de los impactos asociados con partículas presentes en la atmósfera, los equipos para su monitoreo, aplicaciones tecnológicas complementarias y tecnologías de control.

PALABRAS CLAVE:

Calidad del aire, diagnóstico de aire, equipos de control, material particulado, modelos de dispersión.

DIAGNOSIS AND CONTROL OF PARTICULATE MATTER: TOTAL SUSPENDED PARTICLES PM₁₀ BREATHABLE FRACTION ***ABSTRACT**

Particulate matter is one of the most studied atmospheric pollutants around the world. It is defined as the set of solid or liquid particles (except plain water) which are present in suspension in the atmosphere (Mészáros, 1999), and that originate from a variety of natural or anthropogenic sources and have a wide range of morphological, physical, chemical and thermodynamic properties.

The presence of this pollutant in the atmosphere causes a variety of impacts on vegetation, materials and human beings, including a visual decrease in the atmosphere caused by the absorption and diffusion of

light (Chen, Ying & Kleeman, 2009). Furthermore, the presence of particulate matter is associated with increased risk of death from cardiopulmonary causes in samples of adults (Pope, 2004).

Besides measuring this pollutant concentrations, it is necessary to assess its behavior in space and time associating it with meteorological phenomena, chemical composition, and origin of which allows the orientation of control strategies and the performance of follow-up activities by the environmental authorities concerned.

This article presents a literature review of the impacts associated with particles present in the atmosphere, the equipment for monitoring them, complementary technological applications and control technologies.

KEY WORDS:

Air quality, air diagnosis, control equipment, particulate matter, dispersion models.

INTRODUCCIÓN

El material particulado (MP) es un conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, tales como el hollín de diesel, polvo de vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos (Fang *et al.*, 2003). Según la normatividad colombiana, el MP no sedimenta en períodos cortos sino que permanece suspendido en el aire debido a su tamaño y densidad (Resolución 610 de 2010) (MAVDT, 2010). Estas partículas en suspensión (MP) son una compleja mezcla de productos químicos y/o elementos biológicos, como metales, sales, materiales carbonosos, orgánicos volátiles, compuestos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos (Billet *et al.*, 2007).

Debido a que son de tamaño, forma y composición variada, para su identificación se han clasificado en términos de su diámetro aerodinámico que corresponde al diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento que la partícula de interés y que está determinado por la forma y densidad de la partícula. De acuerdo a esto, pueden ser clasificadas como finas y gruesas (García, 2002; Bell *et al.*, 2004), como se presenta en la Figura 1.

Otros autores afirman que el diámetro de las partículas atmosféricas en suspensión, varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm). Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados "modas", que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (Warneck, 1988; EPA, 1996; Seinfeld & Pandis, 1998; Viana, 2003), como se presenta en la Figura 2.

Estas partículas pueden variar su tamaño y composición a través de varios procesos como el vapor de condensación, la evaporación, la coagulación a través de las colisiones del movimiento browniano por la hidrodinámica y fuerzas gravitacionales o eléctricas (Fang *et al.*, 2006). El material particulado posee una amplia gama de propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas (EPA, 2004). Este es emitido a la atmósfera producto de diferentes actividades, tanto

naturales como antropogénicas (Artiñano *et al.*, 2003) como se presenta en la Figura 3. Entre las actividades naturales se encuentran las emisiones volcánicas y las partículas arrastradas por el viento, como el aerosol marino. Dentro de las actividades antropogénicas se encuentran las emisiones de gases de escape y partículas procedentes de los buques de navegación marítima. Además, algunos investigadores (Sternbeck, Sjödin & Andréasson, 2002; Baltrenas & Morküniené, 2006; Richmond-Bryant *et al.*, 2009) han divulgado que la emisión de contaminantes de origen vehicular, constituye una de las causas más relevantes en el deterioro de la calidad del aire (Toro *et al.*, 2001), lo que afecta la composición química de la atmósfera a nivel local y regional (Maldanova *et al.*, 2009). La extracción de la atmósfera del material particulado en suspensión se produce por diversos mecanismos, bien sea por deposición seca o por deposición húmeda, cuya eficacia depende esencialmente del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas (Viana, 2003). El material particulado está asociado con compuestos con conocida actividad genotóxica, mutagénica o carcinogénica (García & Carreras, 2008).

Según el Departamento de Protección Ambiental de Hong Kong (HKEPD), el escape de los vehículos diesel es la principal causa del alto nivel de MP en las zonas urbanas (Ho *et al.*, 2003; Quijano & Orozco, 2005). Los principales elementos encontrados por la quema de combustibles fósiles, transformación de metales e incineración de residuos son el Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, V, Sb (Gao *et al.*, 2002), como se presenta en la Figura 4. Los diferentes elementos presentes en las muestras del material particulado pueden estar asociados con materia mineral, aerosol marino, compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno y compuestos de carbono (Viana, 2003; Viana, Querol & Alastuey, 2006).

Conocer la composición química del material particulado, tiene relevancia no solo desde el punto de vista de la química de la atmósfera, sino también sobre la calidad del aire que se respira en las ciudades (Quijano, Quijano & Henao, 2010).

Muchas propiedades de las partículas pueden influir de manera importante en su comportamiento en el aire y sus efectos sobre el ambiente y la salud. Estas propiedades se presentan en la Tabla1.

Los modelos de contaminación del aire juegan un papel importante en la ciencia, debido a su capacidad para investigar la importancia de procesos relevantes, al igual que un mayor rol en la aplicación. Son los únicos métodos que pueden cuantificar la relación entre emisiones y concentración-deposición, incluyendo las consecuencias de escenarios futuros y las estrategias de disminución (Buitjes, 2001). Estos modelos han sido usados para calcular el impacto de las emisiones volcánicas (Juárez, Gay & Flores, 2005) y modelos productivos (Olivares, 2001; Benavides, 2003; Sahu, Gelfand & Holland, 2006; Torno, 2008).

El objetivo principal de este artículo es describir los impactos asociados al material particulado presente en la atmósfera, los equipos de muestreo, herramientas computacionales, para predecir su comportamiento y las tecnologías utilizadas para su control.

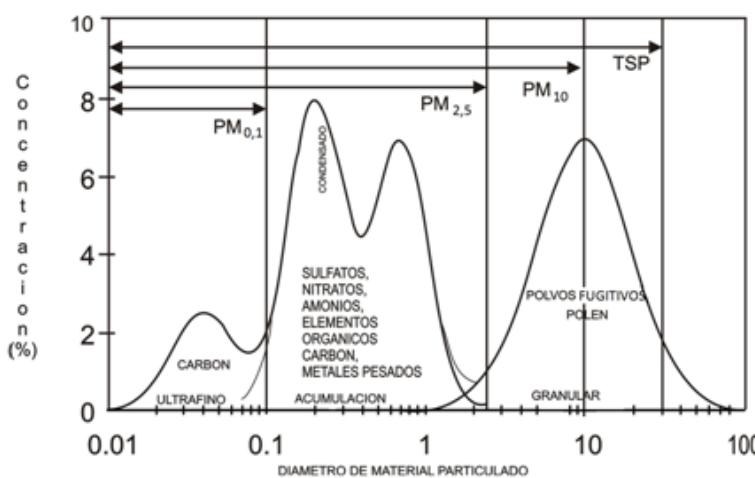


Figura 1. Distribución típica de las partículas en la atmósfera donde se muestran las partículas finas y las gruesas. Tomado de Watson & Chow (2000).

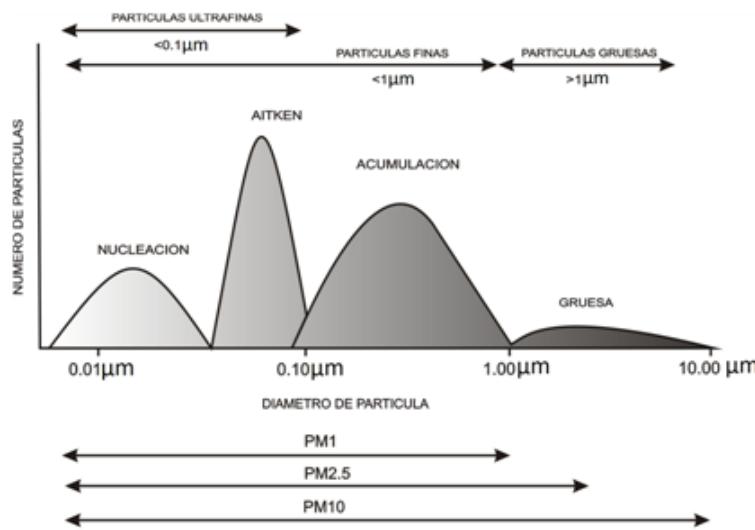


Figura 2. Distribución del número de partículas en función del diámetro. Tomado de Viana (2003).

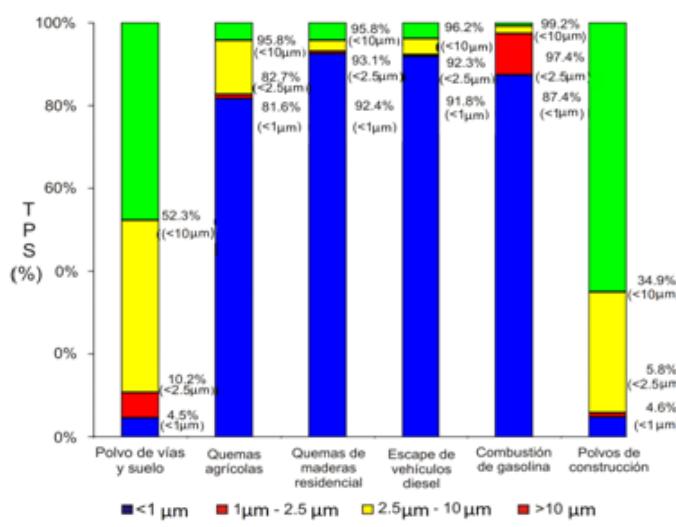


Figura 3. Tamaño de la distribución de partículas de acuerdo a la fuente de emisión (Ahuja *et al.*, 1989; Houck *et al.*, 1989, 1990). Tomado de Chow & Watson (1998).

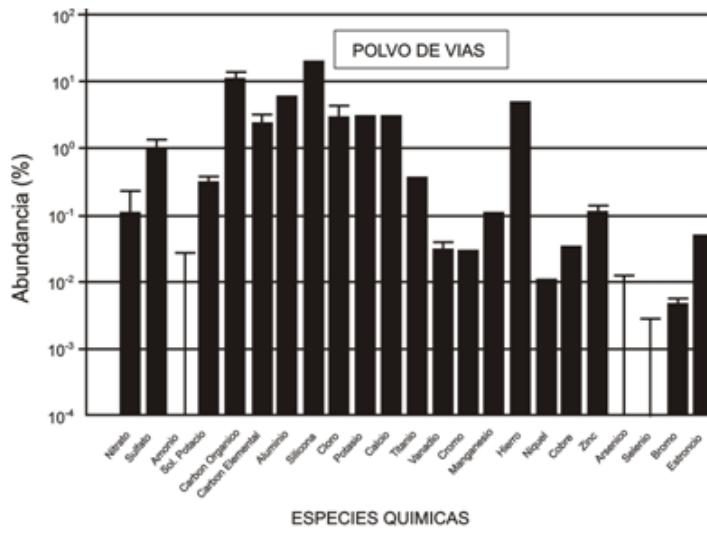


Figura 4. Distribución química del material particulado de acuerdo con el polvo de vías y suelo. Watson & Chow (1994), EPA (2004).

PANORAMA MUNDIAL Y NACIONAL

Investigaciones recientes relacionadas con el material particulado se han realizado en todo el mundo. En Italia (Perrone *et al.*, 2005), España (Viana *et al.*, 2006), Beijing (Wu *et al.*, 2008), Suecia (Sternbeck *et al.*, 2002), China (Zhang *et al.*, 2006) y Estados Unidos (Wilhelm, Qianc & Ritz, 2009), entre otras. En ellas demuestran la presencia de MP en la atmósfera por causas naturales y antropogénicas, manifestando además la necesidad de adelantar estudios detallados relacionados con los efectos causados por la presencia de este contaminante, con el fin de implementar estrategias para el control del mismo.

En Colombia los estudios adelantados sobre este contaminante, han sido desarrollados en las principales ciudades del país como lo describen las siguientes experiencias:

En la ciudad de Santiago de Cali se evidenció, por medio de modelos estadísticos, que durante el periodo marzo-diciembre de 2000, se presentaron varios casos en que la norma local para el área en estudio fue superada. Esta norma local de índice de la calidad del aire, fue calculada de la misma forma en que se calcula la norma local para Cali, con datos registrados dentro del área de estudio, con el objetivo de que fuera específica para la zona de influencia (Botero, Tróchez & Olaya, 2004).

Investigaciones realizadas en el Valle de Aburrá, en relación con partículas en suspensión total (PST), arrojaron que el nivel de contaminación está aumentando en los últimos años y los niveles superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, muy por encima de los niveles de precaución para la salud, definidos por la Organización Mundial de la Salud –OMS– ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Si se considera el material particulado respirable (PM_{10}), el diagnóstico se confirma en su tendencia ascendente con niveles muy altos ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con respecto al umbral de precaución fijado por la Organización Mundial Salud ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para niveles de exposición crónica (Bedoya *et al.*, 2009).

En la ciudad de Medellín se realizaron diferentes mediciones con el fin de determinar las concentraciones de fondo de material particulado y sus variaciones, temporal y espacial. Otras mediciones estuvieron encaminadas a caracterizar física y químicamente el material particulado recolectado. Obteniendo como resultado la variación temporal y espacial de las concentraciones de metales, con valores representativos para el caso de metales como el calcio, hierro y magnesio en las muestras del material colectado (Echeverri, 2000).

Según los estudios realizados sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Marta, las concentraciones más altas coinciden con el periodo de escasas lluvias, entre enero y abril. Al analizar las medias geométricas mensuales de material particulado, se observa que durante todo el periodo de estudio se registraron concentraciones superiores a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayor parte del área urbana de Santa Marta. Se encontró, además, que en todos los meses los mayores niveles de contaminación referida a la concentración de material particulado en el aire, se registran en el área del centro de la ciudad (García, Agudelo & Jiménez, 2006).

En la ciudad de Santa Fe de Bogotá, el estudio efectuado por Solarte *et al.* (1999) determinó una asociación significativa entre el incremento en la concentración básica de material particulado en el aire y el aumento en el número de consultas por enfermedad de vía aérea, superior en menores de 14 años, basado en datos de los hospitales de los barrios Venecia, Bosa y Trinidad Galán. El estudio predice, a partir de sus resultados, que una disminución de PM_{10} en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ produciría una disminución del 17% en el número de consultas por síntomas de enfermedades respiratorias.

Según los estudios de la composición química del MP en la ciudad de Bogotá, la composición es diferente para cada sector. Pero en general las fracciones que más aportan al material particulado son la geológica, asociada a polvo fugitivo y resuspendido, entre el 37 y 42%; las fracciones carbonáceas, que son las que más aportan, entre un 11 y 12% para el carbono elemental y un 34 y 43% para materia orgánica; la fracción iónica se encontró entre un 5 y 8% (Vargas & Rojas, 2010).

En Bucaramanga se caracterizaron mediante análisis físico-químicos de muestras de MP, los metales presentes en el aire-fracción respirable PM₁₀ detectando en los resultados Al, Ca, Fe, Mg y Zn en todas las estaciones y en menor proporción se encontró Pb y algo de Ni y Cu (Quijano, 2004).

En la mayoría de las investigaciones presentadas anteriormente, los niveles de los promedios geométricos anuales superan la norma colombiana para PST y PM10, sin embargo, no superan la norma diaria. Mientras que los resultados de las investigaciones para caracterizar la composición mineral, están principalmente asociados a polvos fugitivos de fracciones carbonáceas emitidas por la combustión de las fuentes móviles y fijas, además de elementos metálicos, cuyas fuentes obedecen en su mayoría a contribuciones antropogénicas y a la resuspensión de partículas por la acción del viento.

Si bien es cierto, se han realizado estudios de monitoreo de partículas suspendidas en la atmósfera de las ciudades colombianas, estos estudios deben ser complementados con trabajos investigativos de partículas cada vez más pequeñas. Para el caso colombiano, solo hasta la vigencia de la Resolución 610 de 2010, se reglamentó la concentración de partículas con diámetro aerodinámico de 2,5 micras. Es recomendable que los estudios relacionados con el MP sean constantes, para ello, se hace necesaria la integración de estrategias de seguimiento por parte de las autoridades ambientales y centros académicos. Además, se requiere implementar estrategias de control para la utilización de combustibles limpios por parte de las autoridades colombianas, con el objeto de minimizar las emisiones de partículas por las fuentes móviles.

ASPECTOS TÉCNICOS

Equipos para medición de material particulado

Los equipos utilizados para la medición de material particulado, succionan una cantidad medible de aire ambiente hacia una caja de muestreo a través de un filtro, durante un periodo de tiempo conocido, generalmente 24 horas. El filtro es pesado antes y después para determinar el peso neto ganado. El volumen total de aire muestreado se determina a partir de la velocidad promedio de flujo y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas en el aire ambiente se calcula como la masa recolectada dividida por el volumen de aire muestreado, ajustado a las condiciones de referencia. Existen dos muestreadores de este tipo que se diferencian en su controlador de flujo, pueden ser de sistema MFC (controlador de flujo de tipo másico) o VFC (controlador de flujo de tipo volumétrico) (MAVDT, 2010).

Otros equipos son instalados directamente sobre las personas, llamados también bombas de muestreo personal. La bomba personal permite realizar mediciones directas de partículas PM10, tomando muestras de aire para medir la concentración de partículas en suspensión (líquido o sólido), proporcionando una continua y directa lectura, así como el registro electrónico de la información.

Según García (2002), en las mediciones de partículas hay muchas causas de error, estas incluyen interferencias, niveles de blancos, reproducibilidad de los métodos de muestreo y muestreo estadístico. Cada medida tiene un grado de incertidumbre debido a los límites de

medición de los equipos y las personas que usan estos equipos. Las principales fuentes de error son:

- Contaminación artificial de las muestras en su manipulación.
- Pérdida de material colectado durante el muestreo, recolección o almacenamiento de los filtros.
- Inadecuado manejo de los filtros durante su transporte o almacenamiento.
- Modificación de las muestras durante su análisis.
- Errores en el manejo de los datos.

Medición de Partículas Suspendidas Totales (PST)

Para la medición de PST se instala un equipo localizado apropiadamente en el sitio de muestreo. Este equipo arrastra una cantidad de aire ambiente a una caja de muestreo a través de un filtro, durante un periodo de muestreo (nominal) de 24 horas, como el que se presenta en la Figura 5. La velocidad de flujo de muestreo y la geometría de la caja, favorecen la recolección de partículas hasta de 25-50 μm (diámetro aerodinámico), según sea la velocidad y dirección del viento. Los filtros usados deben tener una eficiencia mínima de recolección del 99% para partículas de 0,3 μm .

El filtro se pesa (después de equilibrar la humedad) antes y después de usarlo, para determinar el peso (masa) neto ganado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones estándar (25°C, 760 mmHg), se determina a partir de la velocidad de flujo de medida y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas suspendidas en el aire ambiente se calcula como la masa de partículas recolectadas, dividida por el volumen de aire muestreado, corregida de acuerdo con las condiciones estándar y expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar. Para muestras recolectadas a temperaturas y presiones significativamente diferentes a las condiciones estándar, estas concentraciones medidas pueden diferir sustancialmente de las concentraciones reales, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ real, especialmente en alturas elevadas. La concentración real de partículas puede calcularse a partir de la concentración medida, usando la temperatura real y la presión, durante el periodo de muestreo (IDEAM, 2005).

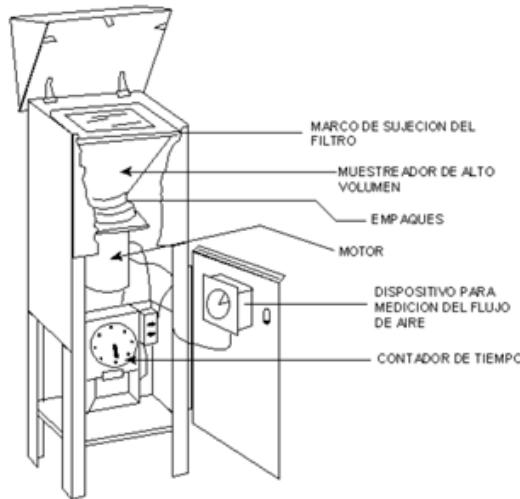


Figura 5. Muestreador de alto volumen (Hi-Vol). Fuente: Redaire (2005).

Medición partículas en suspensión menores de 10 µm (PM₁₀)

Para la medición de las concentraciones de material particulado en suspensión, se pueden emplear equipos para la medición de partículas respirables o medidores de alto volumen PM10, como el presentado en la Figura 6. Estos equipos miden exclusivamente todo el material respirable establecido con tamaño de partícula menor que 10µ; las partículas respirables, son aquellas que logran pasar el tracto respiratorio penetrando en los alvéolos pulmonares (Saldarriaga, Echeverri & Molina, 2004).

Estos equipos arrastran aire ambiente a una velocidad de flujo constante hacia una entrada de forma especial, donde el material particulado se separa por inercia en una o más fracciones, dentro del intervalo de tamaño de PM10. Cada fracción dentro del intervalo de tamaño de PM₁₀ se recolecta en un filtro separado en un periodo de muestreo específico. Cada filtro se pesa (después de equilibrar la humedad), antes y después de usarlo, para determinar el peso neto (masa) ganado debido al PM₁₀ colectado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia (25°C, 101,3 kPa), se determina a partir de la velocidad de flujo medida y el tiempo de muestreo. La concentración básica de PM₁₀ en el aire ambiente, se calcula como la masa total de partículas recolectadas en el intervalo de tamaño de PM₁₀ dividido por el volumen de aire muestreado y se expresa en µg/m³ std. Para muestras de PM₁₀ recolectadas a temperaturas y presiones significativamente diferentes de las condiciones de referencia, las concentraciones corregidas algunas veces difieren sustancialmente de las concentraciones reales (en µg/m³ real), particularmente a grandes elevaciones. Aunque no es requerido, la concentración real de PM₁₀ puede calcularse a partir de la concentración corregida, usando la temperatura ambiente y la presión barométrica promedio durante el periodo de muestreo.

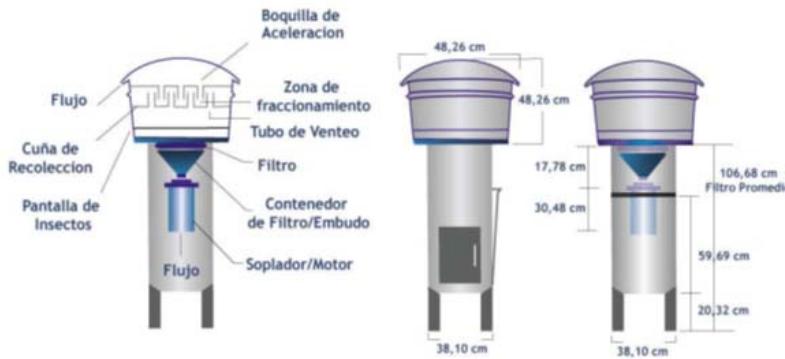


Figura 6. Muestreador Hi-Vol para PM₁₀. Fuente: MAVDT (2010).

Criterios para ubicación de los equipos

El Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (CFR 40), establece los criterios de representatividad para la localización de los sitios de muestreo de partículas suspendidas totales, de la siguiente forma:

- Altura de la toma de muestra sobre el piso: 2-15 m.
- Distancia al árbol más cercano: > 20 m de la circunferencia que marca el follaje o las raíces y por lo menos 10 m, si los árboles actúan como un obstáculo.

- La distancia del muestreador a obstáculos como edificios, debe ser mínimo, el doble de la altura en que sobresale el obstáculo sobre el muestreador. Se recomienda un radio libre de 10 m.
- El equipo debe tener un flujo de aire sin restricciones, 270° alrededor de la toma de muestra y/o un ángulo de 120° libre por encima del equipo.
- No podrá haber flujos de hornos o de incineración cercanos. Se recomienda 20 m de distancia del sitio de muestreo.
- La distancia a las carreteras/caminos debe ser de 2 a 10 m del borde a la línea de tráfico más cercana.

Además se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para el sitio de muestreo:

- Fácil acceso, para visitas regulares de inspección, mantenimiento, calibración, etc.
- Seguridad contra vandalismo.
- Infraestructura: el sitio debe contar con energía eléctrica segura y teléfono.
- Libre de obstáculos que afecten el flujo de aire en las cercanías del muestreador (ej: edificios, árboles, balcones, etc.).

Modelos matemáticos de dispersión

La modelación se utiliza para saber, entre otras cosas, cómo cambia en el tiempo y el espacio la concentración o la razón de mezcla de una sustancia o traza habitualmente identificada como un contaminante criterio, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire y de esta forma colaborar en las decisiones políticas y de planificación respecto a la gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire. La concentración de la emisión en un punto cambia por convergencia o divergencia de vientos, porque la masa es advectada hacia o desde un punto en direcciones horizontales y/o verticales, por la presencia de flujos turbulentos dados por la covariación de fluctuaciones de concentración y viento (Bustos, 2004).

Desde 1970, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA) ha desarrollado una gran variedad de modelos de dispersión atmosféricos de diferente complejidad, usados con fines regulatorios.

Los modelos atmosféricos de la US-EPA están a la vanguardia del desarrollo científico y tecnológico, siendo estos ampliamente reconocidos y utilizados a nivel mundial. Estos modelos, están basados en formulaciones matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes del aire, ya que al dispersarse, reaccionan en la atmósfera. Basándose en los aportes de los datos meteorológicos y de información de la fuente, como las tasas de emisión y la altura de la pila. Estos modelos están diseñados para caracterizar los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera, y en algunos casos los contaminantes secundarios que se forman como resultado de complejas reacciones químicas dentro de la atmósfera.

Estos modelos son importantes para los sistemas de gestión de la calidad del aire, debido a que son ampliamente utilizados por las agencias encargadas de controlar la contaminación del aire, tanto para identificar las contribuciones de origen a problemas de calidad del aire, como para ayudar en el diseño de estrategias efectivas para reducir los contaminantes dañinos del aire. Por ejemplo, los modelos de calidad del aire se pueden utilizar durante el proceso de permisos para verificar que

una nueva fuente no deberá exceder las normas de calidad del aire o, si es necesario, determinar los requisitos apropiados de control adicional. Además, los modelos de calidad del aire, también pueden ser utilizados para predecir las concentraciones futuras de contaminantes provenientes de múltiples fuentes después de la implementación de un programa regulador, con el fin de evaluar la efectividad del programa en la reducción de la exposición dañina a los seres humanos y el ambiente (disponible en <http://www.epa.gov/ttn/scram/aqminindex.htm>).

Estos protocolos matemáticos tienen en cuenta además los parámetros de entrada:

- Cantidad de contaminante emitida por unidad de tiempo.
- Posición y altura de emisión.
- Velocidad y dirección de los vientos dominantes.
- Estabilidad atmosférica.
- Altura de mezclado.
- Comportamiento químico del contaminante (posibles reacciones, vida media).

Tipos de modelos matemáticos

Los modelos matemáticos para el estudio de los contaminantes atmosféricos han sido desarrollados para estudiar el comportamiento de estos a partir de variadas fuentes, según la US-EPA estos modelos están clasificados de la siguiente manera:

Modelos de celda fija (vertimientos homogéneos): se utilizan para obtener estimaciones de concentración de contaminante para emisiones difusas, diseminadas a lo largo de una determinada superficie, como es el caso de una ciudad.

Modelos gaussianos de dispersión (vertimientos puntuales): son los que se utilizan para estimar la concentración de contaminante producida por una fuente puntual, por ejemplo, la chimenea de una fábrica o el escape de un depósito. El objetivo del modelo determina la concentración a cierta distancia de la fuente.

Modelos combinados (celda múltiple): son los que se utilizan en la práctica para estimar concentraciones de contaminante en regiones definidas. Dividen el volumen total del aire en pequeñas celdas en las que se almacenan, de manera numérica, las concentraciones de varios contaminantes. El modelo tiene en cuenta las reacciones químicas sufridas por los contaminantes (vidas medias, constantes de velocidad) así como los flujos de materia que pasan de una celda a sus vecinas.

En el contexto internacional, el modelo más usado para la modelación de calidad del aire es el ISCST3 basado en el Modelo de Dispersión de Gauss, propuesto como regulatorio por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (Motallebi *et al.*, 2003), como se presenta en la Tabla 2.

Modelos recomendados por la US-EPA

Existen diferentes herramientas desarrolladas por la US-EPA para la modelación del material particulado, dentro de los más conocidos se encuentra el Industrial Source Complex (ISC). A corto plazo, este modelo predice las concentraciones de contaminantes, a partir de casi cualquier tipo de fuente de emisión de contaminantes no reactivos. Además, permite definir las redes del receptor y considerar las

características topográficas de cada lugar receptor. También, es capaz de introducir por encima de la altura a nivel del suelo para simular el impacto en la elevación o "asta" a los receptores.

Esta aplicación se utiliza para evaluar el impacto de las emisiones a la atmósfera de una variedad de fuentes industriales, prediciendo las concentraciones de contaminantes en: fuentes puntuales, lineales, de superficie y volumen.

El 9 de diciembre de 2006, AERMOD es totalmente promulgado como un reemplazo para ISC3 y la Agencia lo establece como modelo para la dispersión de contaminantes en el aire, el cual permite analizar la concentración y deposición de la contaminación atmosférica originada por diversas fuentes. El modelo está diseñado para estimar las concentraciones de contaminantes y la deposición procedente de un complejo de fuentes industriales. El modelo predice la concentración de los contaminantes desde el punto continuo, llamarada, área, línea, volumen y fuentes a cielo abierto (Guía práctica: Breeze Aermod/ISC Sistema de modelación de calidad del aire – Versión 7). La última versión 11.103 fue lanzada el 14 de abril de 2011 (disponible en www.breeze-software.com/aermoddep/).

Otro de los modelos recomendados, es la versión del modelo de dispersión en alta mar y las zonas costeras (OCD por sus siglas en inglés), definido como una línea recta modelo gaussiano, desarrollado para determinar el impacto de las emisiones en alta mar a partir de fuentes puntuales, de área o línea de la calidad del aire de las regiones costeras. OCD incorpora el transporte sobre el agua y la dispersión de la pluma, así como los cambios en el comportamiento del contaminante por los cambios de superficie en la línea costera. Para el uso de esta aplicación se necesitan datos meteorológicos de lugares en alta mar y en tierra.

Tecnologías de control para emisiones de material particulado

Las tecnologías utilizadas para el control de las emisiones de material particulado para fuentes fijas corresponden a:

Ciclones: son equipos de recolección de polvo que se usan con mayor frecuencia. Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga. Son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5 μm con eficiencias hasta del 90%; aunque partículas mucho más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas (Echeverri, 2006).

Multiciclones: son básicamente un conjunto de pequeños ciclones de alta eficacia, reunidos en un colector común. Al igual que los ciclones ordinarios, separan las partículas del gas a tratar mediante el centrifugado del mismo. La eficacia de los multiciclones para polvo con partículas entre 80 y 120 micras es del 95 al 98% (Mejía & Oviedo, 2006).

Lavador Venturi: el lavador inyecta chorros finos de líquido (generalmente agua) a alta velocidad en la estrechamiento de un Venturi, el líquido se atomiza y se mezcla con la corriente de gases en la zona de expansión. Los lavadores Venturi pueden alcanzar el 99% de eficiencia en la remoción de partículas pequeñas. Sin embargo, una desventaja de este dispositivo es la producción de aguas residuales (Mejía & Oviedo, 2006). Las eficiencias de recolección de los depuradores tipo Venturi varían del 70 a más del 99 por ciento, dependiendo de la aplicación. Las

eficiencias de recolección son generalmente más altas para la MP con diámetros aerodinámicos de aproximadamente 0,5 a 5 mm. Algunos depuradores tipo Venturi están diseñados con una garganta ajustable para controlar la velocidad de la corriente de gas y la caída de presión (EPA-452/F-03-017) (disponible en <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/fventurs.pdf>).

Precipitador Electrostático: este dispositivo de control de partículas utiliza fuerzas eléctricas para mover las partículas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector. A las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a que pasen a través de una corona, una región en la cual fluyen iones gaseosos. El campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes, proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo (EPA-452/B-02-002) (disponible en http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/c_allchs-s.pdf). La eficiencia de estos equipos depende de factores como la humedad de los gases del efluente, la resistividad de la mezcla del gas, partículas, etc. Permite tratar grandes flujos de gas a altas temperaturas y posee buena eficiencia para la recolección de particulado fino (Mejía & Oviedo, 2006).

Filtros de Mangas: son considerados como los equipos más representativos de la separación sólido-gas. Su función consiste en recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa haciéndolas pasar a través de un tejido. En general, un filtro es una estructura porosa compuesta de material fibroso que tiende a retener las partículas según pasa el gas que las arrastra, a través de los espacios vacíos del filtro (Echeverri, 2008).

CONCLUSIONES

Las consecuencias relacionadas con la presencia de altos niveles de material particulado en la atmósfera, están altamente relacionadas con enfermedades cardiorrespiratorias en el hombre, deterioro de materiales y otros efectos. De su estudio depende identificar el aporte de las fuentes reales que deterioran la calidad de vida del hombre y su entorno.

Es notorio, entonces, resaltar los avances de la ingeniería en estudiar los fenómenos asociados con el comportamiento en la atmósfera del material particulado, con el objeto de predecir los riesgos e impactos a los que el hombre se encuentra expuesto por la presencia de partículas en el medio y de esta manera desarrollar medidas de control para mejorar la gestión pública ambiental y con ello mejorar la calidad del aire.

Este artículo brinda las herramientas necesarias para que los lectores de la comunidad académica que no se encuentra especializada, tengan una orientación clara y precisa de los equipos útiles existentes para enfrentar la problemática en la salud y otros tópicos, relacionada con el material particulado en el ambiente. Estas herramientas tecnológicas utilizadas para su estudio, equipos para diagnóstico y control de este contaminante presente en la atmósfera, son útiles para realizar predicciones orientadas a desarrollar programas de prevención en enfermedades prevalentes en la población y que pueden influir en la tasa de mortalidad, como en el caso de las enfermedades respiratorias en niños y ancianos.

La concentración y distribución de tamaños aerodinámicos del material particulado, depende de muchas variables locales en la zona de estudio y aunque sus efectos han sido estudiados por muchos autores en todo el mundo, se deben orientar estudios localizados determinando la relación entre los elementos mineralógicos y químicos encontrados en las muestras con los ingresos a los centros hospitalarios por afectaciones respiratorias en las poblaciones aferentes a las zonas muestreadas.

Por otra parte, se hace necesaria la innovación e implementación de tecnologías de equipos para el control de las partículas emitidas a la atmósfera por el sector productivo, así como el compromiso del sector industrial enmarcados en procesos de mejora continua.

Tabla 1. Procesos que afectan la suspensión del material particulado. Modificado de Viana (2003).

Propiedad	Características
Superficie	La mayor parte de los suelos son reservorios limitados, el polvo suspendible disminuye después de un corto tiempo en ausencia directa de la abrasión. Esta disminución es representada como un exponencial negativo, o una función inversa de tiempo. La disminución de las partículas finas frecuentemente resulta en la exposición de las partículas no erodables que forman un escudo contra la suspensión por la acción del viento. Cuando las superficies son continuamente afectadas por vientos muy intensos, por movimiento vehicular y por otras actividades humanas se crea un reservorio ilimitado que emite partículas de polvo.
Tamaño	La distribución del tamaño de las partículas afecta los procesos de suspensión. Una capa plana de partículas con diámetros menores a 20 μm es difícilmente suspendida por el viento.
Humedad	El agua adherida a las partículas de suelo incrementa su masa y las fuerzas de tensión superficial, lo que disminuye su suspensión y transporte. La excesiva humedad causa que el polvo se adhiera a las llantas de los vehículos llevándolo fuera de las áreas de emisión, este polvo que es depositado en el pavimento puede suspenderse convirtiéndose en un nuevo foco de emisión.
Densidad	La velocidad de una partícula en respuesta a fuerzas gravitatorias o de inercia aumenta según la raíz cuadrada de su densidad.

Tabla 2. Modelos gaussianos utilizados para fuentes fijas. Tomado de US-EPA.

Aplicación	Descripción
SCREEN3	Modelo de dispersión gaussiano para una sola fuente, el cual provee las concentraciones a nivel terrestre de fuentes tipo punto, área, volumen y candela, como también concentraciones en zonas de cavitación y concentraciones debido a inversiones y fumigación. El modelo SCREEN3 es la versión screening del modelo ISC3. EPA-454/B-95-004.
CTSCREEN	Modelo de dispersión de pluma gaussiana diseñado como una técnica screening de carácter regulatorio para determinar el impacto en terrenos complejos. CTSCREEN es la versión screening del modelo CTDMPPLUS. EPA-600/8-90-08.
SDM	El modelo Shoreline Dispersion Model (SDM) es un modelo de dispersión gaussiana, empleado para modelar la dispersión de múltiples fuentes con el fin de determinar la concentración de contaminantes al nivel del suelo, debido a fuentes estacionarias muy altas cerca a zonas costeras. EPA-450/4-88-017.
ISC3	Modelo de dispersión de pluma gaussiana que se emplea para evaluar la concentración de contaminantes de una amplia variedad de fuentes asociadas a actividades industriales complejas. Este modelo tiene en cuenta la sedimentación y deposición seca de partículas, caída de la pluma, fuentes puntuales de área y volumen, elevación de la pluma como una función de la distancia, separación de fuentes puntuales y ajuste del terreno. ISC3 opera en modos de corto y largos períodos de tiempo. EPA-454/B-95-003a.
ISCST3	Modelo de dispersión de pluma gaussiana que se emplea para evaluar la concentración de contaminantes de una amplia variedad de fuentes asociadas a actividades industriales complejas. Este modelo tiene en cuenta sedimentación y deposición seca de partículas, caída de la pluma, fuentes puntuales de área y volumen, elevación de la pluma como una función de la distancia, separación de fuentes puntuales y ajuste del terreno. ISCST3 opera en modos de cortos períodos de tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahuja, M.S., Paskind, J., Houck, J.E., Chow, J.C., (1989). Design of a Study for the Chemical and Size Characterization of Particulate Matter Emissions from Selected Sources in California. in Transactions: Receptor Models in Air Resources Management, J.G. Watson, Ed., Air & Waste Management Assoc., Pittsburgh, PA, pp. 145-158.
- Artiñano, B., Salvador, P., Alonso, D., Querol, X., y Alastuey, A. (2003). Anthropogenic and natural influence on the PM10 and PM2.5 aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. *Environmental Pollution*, 125, 453-465.
- Bedoya, J. y Martínez, E. (2009). calidad del aire en el valle de aburrá Antioquia –Colombia., Dyna, Vol. 76, Núm. 158, pp. 7-15. Universidad Nacional de Colombia
- Bell, M., Samet, J., y Dominici, F., (2004). Time-series studies of particulate matter. Annual Review of Public Health Palo Alto., Vol. 25; p. 247-280.
- Baltrénas, P., y Morkūnienė, J. (2006). Investigation of particulate matter concentration in the air of Žvėrynas district in Vilnius. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, XIV(1), 23-30.
- Benavides, H. (2003). *Pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.
- Billet, S., Garc-on, G., Dagher, Z., Verdin, A., Ledoux, F., Cazier, F., Courcot, D. Aboukais, A., y Pirouz, S.P. (2007). Ambient Particulate Matter (PM_{2.5}): Physicochemical characterization and metabolic activation

- of the organic fraction in human lung epithelial cells (A549). *Environmental Research*, 105, 212-223.
- Botero, S., Tróchez, A., y Olaya, J. (2004). Contaminación por Partículas Suspendidas Totales en las comunas 6 y 7 de Cali, Colombia. Un modelo estadístico para la evaluación de la calidad del aire. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 1(2), 17-21.
 - Builjet, P.J.H. (2001). *Major twentieth century milestones in air pollution modeling and its application*. Gryning and Schiermeier, Kluwer Academic/Plenum Publishers.
 - Bustos, C. (2004). *Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: Análisis del proceso*. Tesis de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental, Universidad de Chile.
 - Chen, J., Ying, Q., y Kleeman, M. (2009). Source apportionment of visual impairment during the California regional PM₁₀/PM_{2.5} air quality study. *Atmospheric Environment*, 43, 6136-6144.
 - Chow, J., y Watson, J. (1998). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards (MD-14). *Guideline on Speciated Particulate Monitoring*.
 - Echeverri, C. (2000). Determinación de las concentraciones de fondo de material particulado en suspensión en la ciudad de Medellín. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 20, 7-19.
 - _____. (2006). Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9).
 - _____. (2008). Diseño de filtros de talegas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12), 43-60.
 - EPA -Environmental Protection Agency-. (1988). *User's guide to SDM a shoreline dispersion model*. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. EPA-450/4-88-017.
 - _____. (1990). *User's guide to ctdm-plus: volume 2. The screening mode (CTSCREEN)*. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. EPA-600/8-90-08.
 - _____. (1995). *SCREEN3 Model User's Guide*. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. EPA-454/B-95-004.
 - EPA -Environmental Protection Agency-. (1996). Air Quality Criteria for Particulate Matter. EPA. Vol. 1.
 - _____. (2000). *Guía del usuario para los modelos de dispersión de la fuente industrial compleja (ISC3)*. Volumen 1- instrucciones para el usuario. EPA-454/B-95-003a.
 - _____. (2004). *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. Volume I of II. EPA/600/P-99/002Af.
 - Fang, G.C., Chang, C.N., Chu, C.C., Wu, Y.S., Fu, P., Yang, I.L., y Chen, M.H. (2003). Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM_{2.5} and PM_{2.5-10} aerosols at a farm sampling site in Taiwan Taichung. *The Science of the Total Environment*, 308, 157-166.
 - Fang, G.C., Wu, Y.S., Chang, S.Y., Rau, J.Y., Huang, S.H., y Lin, C.K. (2006). Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site. *Toxicology and Industrial Health*, 22, 2-37.
 - Gao, Y., Nelson, E.D., Field, M.P., Ding, Q., Li, H., Sherrell, R.M., Gigliotti, C.L., Van Ry, D.A., Glenn, T.R., y Eisenreich, S.J. (2002). Characterization of atmospheric trace elements on PM_{2.5} particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary. *Atmospheric Environment*, 36, 1077-1086.
 - Garcia, F.F. (2002). Determinación de la Concentración de Fondo y Distribución Espacial de PST en Santa Marta. Grupo de Control de la Contaminación Ambiental. Universidad del Magdalena, Colombia.
 - García, F.F., Agudelo, R., y Jiménez, K. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 24(2), 73-82.

- García, M., y Carreras, H. (2008). Análisis de la genotoxicidad de material particulado recolectado en dos ciudades de la Provincia de Córdoba, Argentina, mediante el ensayo de micronucleus. *Theoria*, 17(1), 33-40.
- Ho, K.F., Lee, S.C., Chan, C., Yu, J., Chow, J., y Yao, X.H. (2003). Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM10 aerosols in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 37, 31-39.
- Houck, J. E., Chow, J. C., Watson, J. G., Simons, C. A., Pritchett, L. C., Goulet, J. M., Frazier, C. A. (1989). Determination of particle size distribution and chemical composition of particulate matter from selected sources in California: volume I and executive summary (final report). Sacramento, CA: California Air Resources Board.
- Houck, J. E., Goulet, J. M., Chow, J. C., Watson, J. G., Pritchett, L. C. (1990). Chemical characterization of emission sources contributing to light extinction. In: Mathai, C. V., ed. *Visibility and fine particles: an A&WMA/EPA international specialty conference*; October 1989; Estes Park, CO. Pittsburgh, PA: Air & Waste Management Association; pp. 437-446. (A&WMA transactions series no. TR-17).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM–. (2005). *Protocolo para la vigilancia y seguimiento del módulo aire del sistema de información ambiental*. Bogotá.
- Juárez, A., Gay, C., y Flores, Y. (2005). Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México. *Atmósfera*, 18(1), 57-69.
- Mejía, M., y Oviedo, I. (2006). *Estimación de las funciones de costo marginal de abatimiento del material particulado para fuentes fijas en el Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Mészáros, E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiadó.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial –MAVDT–. (2010). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.
- _____. (2010). *Resolución 610*.
- Moldanova, J., Fridell, E., Popovicheva, O., Demirdjian, B., Tishkova, V., Faccinetto, A., y Focsa, C. (2009). Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine. *Atmospheric Environment*, 43, 2632-2641.
- Motallebi, N., Tran, H., Croes, B.E., y Larsen, L.C. (2003). Day-of-Week Patterns of Particulate Matter and Its Chemical Components at Selected Sites in California. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53, 876-888.
- Olivares, G. (2001). *Dispersión regional de azufre oxidado en Chile central*. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Perrone, M.R., Turnone, A., Buccolierib, A., y Buccolierib, G. (2005). Particulate matter characterization at a coastal site in south-eastern Italy. *Journal of Environmental Monitoring*. First published as an advance article on the web 6th December. DOI: 10.1039/b513306h.
- Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., y Thurston, G.D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9), 1132-1141.
- Pope (2004). CA III. Air Pollution and Health - Good News and Bad. En: *New England Journal of medicine* Vol. 351. No. 11, 1132-1134.
- Quijano, A. (2004). Promedios geométricos de material particulado fracción respirable PM₁₀ y detección de metales en el aire de Bucaramanga (Colombia). *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 2(002), 21-32.
- Quijano, A., y Orozco, J. (2005). Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM_{2.5}) en Pamplona (Colombia). *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 1-11.

- Quijano, A., Quijano, M., y Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2,5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. Bistua: *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(1), 1-20.
- Red de Vigilancia de la Calidad del Aire –Redaire–. (2005). *Protocolo para el muestreo de partículas suspendidas totales (PST) utilizando el equipo muestreador de alto volumen hi-vol para PST*. Obtenido el 15 de julio de 2011, desde <http://www.unalmed.edu.co/redaire/Protocolos/Protocolo%20Hi-Vol.pdf>
- Richmond-Bryant, J., Saganich, C., Bukiewiez, L., y Kalin, R. (2009). Associations of PM_{2,5} and black carbon concentrations with traffic, idling, background pollution, and meteorology during school dismissals. *Science of the Total Environment*, 407, 3357-3364.
- Sahu, S., Gelfand, A., y Holland, D. (2006). Spatio-Temporal Modeling of Fine Particulate Matter American Statistical Association and the International Biometric. *Society Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 11(1), 61-86.
- Saldaña, J., Echeverri, C., y Molina, F. (2004). Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM₁₀) en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 32, 7-16.
- Seinfeld, J., y Pandis, S. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1323p.
- Solarte, I., Caicedo, M., Restrepo, S. (1999) Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Santafé de Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Sternbeck, J., Sjödin, A., y Andréasson, K. (2002). Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension-results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment*, 36, 4735-4744.
- Torno, S. (2008). *Emisiones de material particulado en almacenamiento de minerales a la intemperie*. Colección Tesis Doctoral-TDR nº 49. ISBN: 978-84-692-1368-1.
- Toro, M., Ramírez, J., Quiceno, R., y Zuluaga, C. (2001). Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR. Grupo de Investigaciones Ambientales – GIA. Universidad Pontificia Bolivariana. *Revista Acodal*, 191, 42-49.
- Vargas, F., y Rojas, N. (2010). Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 105-115.
- Viana, M. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.
- Viana, M., Querol, X., y Alastuey, A. (2006). Chemical characterisation of PM episodes in NE Spain. *Chemosphere*, 62, 947-956.
- Watson, J., y Chow, J. (2000). *Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research*. DRI Document No 6110.4F. Desert Research Institute. Energy and Environmental Engineering Center.
- Warneck, P. (1988). *Chemistry of the natural atmosphere*. International Geophysics Series. Vol. 41. Wiley & Sons. Academy Press. 757p.
- Wilhelm, M., Qianc, L., y Ritz, B. (2009). Outdoor air pollution, family and neighborhood environment, and asthma in LAFANS children. *Health & Place*, 15, 25-36.
- Wu, Z., Hu M., Lin P., Liu S., Wehner B., Alfred Wiedensohler A., (2008) Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China. *Atmospheric Environment* 42, 7967-7980.
- www.breeze-software.com/aermodepa/
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/fventurs.pdf
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/c_allchs-s.pdf

- www.epa.gov/ttn/scram/aqmindex.htm
 - Zhang, W., Sun, Y., Zhuang, G. y Xu, D..(2006). Characteristics and Seasonal Variations of PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP Aerosol in Beijing. *Biomedical and Environmental Sciences* 19, 461-468.
-

* Artículo de Revisión.

1. Ing. Ambiental y Sanitario, Universidad del Magdalena. Candidato a Maestría en Ciencias Ambientales–SUE–Caribe, sede Universidad del Atlántico. Docente Investigador, Línea de Aire. Grupo de Investigaciones GIA, Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco, Cartagena, Colombia.