

Partículas respirables en el aire: generalidades y monitoreo en Latinoamérica¹

Artículo de Revisión - Fecha de recepción: 19 de junio de 2012 - Fecha de aceptación: 22 de agosto de 2012

Angélica Patricia Garrido

Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia, garridogap@gmail.com.

Yiniva Camargo

Ingeniera Química, Magister en Educación Ambiental, Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia, ycamargo@unimagdalena.edu.co

RESUMEN

Para analizar los avances sobre este tema se realizó una revisión de la literatura a través de la búsqueda de información de forma manual y en las bases electrónicas Latindex, Redalyc, Scielo y Science Direct. La revisión tuvo como objetivo la recopilación de estudios que permitieran obtener una visión general del concepto de partículas respirables (PM_{10} y $PM_{2.5}$), principales fuentes de emisión, niveles ($\mu g/m^3$), y su monitoreo en las principales ciudades de Latinoamérica. Los resultados permitirán conocer la situación y el avance en materia de partículas respirables en las principales ciudades de América Latina y con ello contribuir con información para la construcción de políticas, programas y criterios normativos que apunten a mejorar la calidad del aire.

Palabras clave

Calidad del aire, material particulado, concentración PM_{10} , $PM_{2.5}$, fuentes, emisión, red de monitoreo.

-
1. Artículo derivado del proyecto de investigación titulado: *Distribución espacio temporal de partículas suspendidas totales en la zona costera del departamento del Magdalena, periodo 2006-2009*. Proyecto para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario, Universidad del Magdalena.

*Respirable particles in the air:
basic concepts and monitoring in Latin American*

ABSTRACT

In order to analyze updates about this matter, a literature review was performed by finding information manually and in electronic databases such as Latindex, Redalyc, SciELO and Science Direct. The review aims was compiled studies allowed to obtain an overview of the concept of respirable particles (PM_{10} and $PM_{2.5}$), major emission sources, levels ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), and monitoring in major Latin American cities. The results of the manuscript will allow to know the status and make progress in respirable particulate issues in major cities in Latin America, and thus, contribute with solid information for policy approaches, policy shaping, and programs to promote and support not only information generation to control air quality, but to actually improve it in Latin America.

Keywords

Air quality, particle material, concentration PM_{10} , $PM_{2.5}$, sources, emission, monitoring network.

INTRODUCCIÓN

El material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ es un contaminante estudiado en países latinoamericanos, europeos y asiáticos. Estas partículas son frecuentemente clasificadas como primarias (emitidas directamente a la atmósfera) o secundarias (se forman o modifican en la atmósfera por condensación, crecimiento o cambio químico de los gases). El material particulado secundario tiende a ser más fino en tamaño, y se forma en la atmósfera a través de conversión física y química de precursores gaseosos como los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), y compuestos orgánicos volátiles [1], [2].

La creciente industrialización está obligando a la sociedad en general a la búsqueda de estrategias para el control de emisión de estas partículas, y a la implementación continua de monitoreos que permitan manejar información útil en la determinación de la calidad del aire [3].

La presencia de este tipo de contaminación en el aire representa un peligro para la población humana por los efectos adversos que produce sobre las funciones respiratorias; estudios desarrollados en Cuba, México y Brasil reportan incrementos en las consultas de urgencia por asma y por infecciones respiratorias agudas [4], [5]; por ello, es necesario implementar en países industrializados y en aquellos en los que existe un nivel moderado de actividad industrial, la creación de redes de monitoreo de calidad de aire, con el objetivo de verificar las concentraciones de partículas respirables en el aire y compararlas con la normatividad vigente de cada país.

En la actualidad se ha incrementado la preocupación por desarrollar acciones que amplíen el conocimiento existente sobre material particulado; de hecho, es cada vez más notable la ejecución de proyectos de investigación en diferentes países encaminados a realizar un aporte relacionado con el comportamiento de las partículas respirables en el ambiente.

Para la elaboración de este escrito se utilizó una metodología descriptiva, y teniendo en cuenta el contenido de los artículos y documentos recopilados durante la búsqueda realizada, se agrupó la información bajo cuatro enfoques principales: Generalidades sobre partículas respirables, Fuentes de emisión, Monitoreo en Latinoamérica y Monitoreo en Colombia.

Los estudios mostrados proporcionarán una visión general sobre las publicaciones en materia de partículas respirables y permitirá verificar el progreso de las ciudades latinoamericanas citadas en las estrategias de monitoreo de PM_{10} y $PM_{2.5}$.

GENERALIDADES

Las variaciones espaciales y temporales en la concentración y composición del material particulado son importantes para conocer los procesos antropogénicos y atmosféricos que influyen en la distribución y formación de partículas, así como también para la creación de estrategias de manejo de efectos [2].

Con el incremento de la industrialización es cada vez más frecuente el uso e implementación de programas y/o metodologías ambientales para la evaluación de redes que

garanticen la representatividad de los volúmenes de aire captados en los puntos de monitoreo. Estrategias como la recopilación de inventarios de las fuentes de emisión de mayor contribución de material particulado en el aire de la zona, la elección de sitios representativos de muestreo, o el uso de programas computacionales, contribuyen al desarrollo de las metodologías ambientales [6]-[8].

El material particulado involucra diversos tipos de partículas agrupadas de acuerdo con sus propiedades específicas; uno de los criterios que se toman en cuenta para su clasificación es el comportamiento aerodinámico, que permite dividir las en dos grandes grupos: partículas sedimentables y partículas suspendidas, siendo estas últimas las principales causantes de los problemas ambientales debido a que permanecen por largo tiempo en la atmósfera. Las partículas suspendidas a su vez se subdividen en partículas suspendidas totales (PST), partículas respirables identificadas como las partículas menores a 10 micrómetros y partículas respirables finas $PM_{2.5}$ [9]-[11].

El material particulado respirable consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean [9]. Las partículas respirables pueden estar constituidas por metales como silicio, calcio, zinc, plomo, hierro y cadmio, así como también por compuestos de nitrógeno, azufre y carbono [12].

A diferencia de otros contaminantes, el material particulado respirable es emitido

por numerosas fuentes, que determinan las propiedades físicas y la composición química de las partículas respirables. Las principales fuentes de emisión de material particulado respirable se encuentran en las zonas urbanas e industriales, siendo las emisiones vehiculares la fuente más significativa de partículas respirables en la zona urbana. Los procesos erosivos que dan origen a polvos finos y, en algunas ocasiones, la cocción de alimentos, son consideradas también fuentes de estas partículas [13], [14].

PRINCIPALES FUENTES DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS RESPIRABLES

Las fuentes de emisión de partículas respirables pueden ser de origen natural o antropogénico. Dentro de las principales fuentes de origen natural se encuentran los fenómenos de contaminación asociados a las emisiones de polvo africano, los eventos de resuspensión de polvo, recirculación y el transporte de masas de aire [15].

El polvo del Sahara (África) incide sobre los niveles de PM_{10} en las Islas Canarias; los resultados mostrados por las mediciones de las estaciones localizadas en el archipiélago, evidencian un aumento de las concentraciones de PM_{10} durante el invierno, alcanzando valores de $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el marco del proyecto AEROCE, se observó que la frecuencia de ocurrencia de los episodios de polvo africano fue de 46% en invierno, mientras que en verano fue de 29%; lo anterior explica en cierto modo la influencia de los episodios de polvo africano sobre el incremento de las concentraciones de PM_{10} durante esa época del año [16].

El polvo del Sahara afecta también las concentraciones de PM_{10} en las costas de Túnez, en el Mediterráneo, debido a la generación de plumas que son transportadas a través del mar mediterráneo durante todo el año. Es importante resaltar que la ocurrencia de este episodio de contaminación, producto del transporte de polvo del Sahara, es mayor en la región mediterránea durante el verano. La concentración anual de PM_{10} en las costas de Túnez excedió en todas las estaciones de muestreo los límites dictados por la Unión Europea ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$); los valores obtenidos oscilaron entre 200 y $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, los niveles más críticos se presentaron en PM_{10} por hora, con concentraciones de 400 a $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [17], [18].

Las diferencias relacionadas con los períodos de mayor concentración de PM_{10} entre las Islas Canarias y las costas de Túnez se deben a los períodos de ocurrencia de los episodios saharianos. En las Islas Canarias estos episodios ocurren durante el invierno mientras que en el Mediterráneo suceden durante el verano; como consecuencia el polvo es transportado hacia las Islas Canarias durante el invierno, mientras que en el período de verano es transportado hacia las costas del Mediterráneo, obteniéndose como resultado altos registros en las Islas Canarias durante el invierno y altos registros en las costas del Mediterráneo durante el verano [19].

En el mismo contexto geográfico, el sur y el este de España, además de ser afectados por los eventos de contaminación local y por los brotes de polvo africano, son impactados por eventos de resuspensión de polvo, de recirculación y de transporte de masas de

aire. El transporte de las corrientes de aire direcciona el material particulado respirable (PM_{10}) proveniente de la zona urbana/industrial, hacia las poblaciones rurales del este de España [20]-[22].

Si bien la dirección del viento no es propiamente una fuente de emisión de PM_{10} , sí constituye un factor fundamental en el comportamiento de las partículas respirables. Estudios ejecutados por la Universidad de Antioquia (Colombia) muestran una distribución de las partículas respirables en relación con los regímenes de viento de la zona analizada (Valle de Aburrá); en los resultados de la investigación se observó un incremento en la relación PM_{10}/PST hacia el sur, debido principalmente a que las partículas más pequeñas fueron transportadas en la dirección del viento, del norte hacia el sur de la zona muestreada [10].

Otra fuente natural importante son las erupciones volcánicas. En Argentina la erupción, en el 2008, del volcán Chaitén, localizado en Chile, tuvo un impacto significativo en el incremento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} ; en el estudio realizado en junio de 2008 se registraron concentraciones diarias de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y de $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} [23].

En lo que respecta a las principales fuentes de origen antropogénico, varios estudios demuestran que las partículas respirables surgen como producto de procesos industriales, emisiones vehiculares, entre otras, siendo los países industrializados los principales generadores de concentraciones de material particulado respirable como subproducto de diversas actividades antropogénicas [24]. En España, por ejemplo, el

48% de la masa de PM_{10} es producto de los escapes de vehículos [25].

Por su parte, Taiwán cuenta con fuentes de emisión de $PM_{2.5-10}$ y de $PM_{2.5}$. Para $PM_{2.5-10}$ las fuentes de emisión corresponden a actividades agrícolas y combustión del carbón, mientras que para $PM_{2.5}$ la movilización de vehículos es la fuente principal de emisión a la atmósfera. En el estudio se obtuvieron concentraciones anuales de $24,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5-10}$ y de $58,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ [26]. Del mismo modo, en Taichung Harbor (Taiwán), estas actividades también constituyen una fuente de emisión de material particulado respirable. Los resultados de la investigación reportaron concentraciones promedio anuales dentro de un rango de $54,03 \pm 16,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y de $30,31 \pm 9,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5-10}$. Comparando los valores obtenidos para $PM_{2.5}$ con el valor estipulado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ($15 \mu\text{g}PM_{2.5}/\text{m}^3$ anual), se tiene que las concentraciones se encuentran por fuera de los rangos [27]-[29].

En América Latina las actividades desarrolladas por las ciudades en rápido crecimiento contribuyen significativamente al deterioro de la calidad del aire; en las principales urbes las fuentes móviles son responsables de las altas concentraciones de material particulado; en los países que conforman esta región gran parte de la flota está constituida por vehículos de gasolina (nafta) y camiones de diesel con tecnologías anticuadas y combustibles de baja calidad. En la última década es evidente el aumento del transporte, el total de la flota vehicular en México, Brasil y Chile creció en 211%, 230% y 219%, respectivamente,

en San Salvador (El Salvador), por ejemplo, los buses antiguos y camiones constituyen solo un 10% de los vehículos, pero contribuyen en un 75% de las emisiones para el transporte. El contenido de azufre en diesel (Tabla I) seguirá incrementando la emisión de partículas ambientales en la región de América Latina y el Caribe [8].

En Santiago de Chile los resultados arrojados por 10 estaciones de monitoreo presentan concentraciones de PM_{10} entre $80,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valores superiores a los estipulados por la norma anual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$); estas concentraciones se encuentran influenciadas por el incremento del parque automotor. Se estima que a la ciudad ingresaron durante el año 2010 aproximadamente 200.000 nuevos automóviles [30]; en otras ciudades de Chile como Talca, las altas concentraciones diarias ($283 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se asocian con la combustión de la leña en los hogares durante la temporada de invierno [31]. Por otro lado, Quito (Ecuador) atribuye el 20% de las emisiones de material particulado a fuentes móviles, 52% a centrales térmicas, 25% a la combustión industrial y el 5% restante a actividades de comercio y servicio [32]. Los resultados del informe anual de calidad del aire de Quito (Ecuador), evidencian que en ninguna de las nueve estaciones de monitoreo se supera la norma anual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para PM_{10} , la máxima concentración se obtuvo en la estación Camal ($45,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$); sin embargo, para las mediciones de $PM_{2.5}$ se supera en todas las estaciones la norma anual ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), obteniéndose concentraciones de $23,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, asociadas principalmente a la combustión en industrias y combustión que involucre combustibles fósiles [33].

TABLA I
CONTENIDO DE AZUFRE EN EL DIESEL

País	% de azufre
El Salvador	0,50
Panamá	0,50-1,50
Argentina	0,15
Colombia	0,10-0,40
Chile	0,005-0,03
México	0,03-0,5
Brasil	0,20
Uruguay	0,25
Bolivia	0,35
Perú	0,035-0,50

Fuente: [8]

Colombia, a pesar de ser un país con baja actividad industrial en comparación con países como Estados Unidos o México, en los últimos años ha demostrado interés en el desarrollo de conocimientos relacionados con la emisión de material particulado a la atmósfera; ciudades como Medellín y Bogotá realizan aportes para la construcción de bases sólidas en temáticas de contaminación ambiental producto de las emisiones de fuentes antropogénicas. En Medellín las principales fuentes de emisión de partículas respirables son el tránsito de vehículos y la presencia de un sector industrial textil, de alimentos y metal-mecánico. En la investigación desarrollada en Medellín se estudiaron 110 datos tomados entre el mes de mayo y el mes de septiembre de 2000; mediante su análisis se evidenció el incumplimiento de la norma anual (establecida por la EPA) para PM_{10} , debido a que se superó el límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 92% de los casos [10], [34].

De igual modo, en Bogotá una de las principales fuentes de PM_{10} lo constituye el tráfico vehicular. En un estudio llevado a cabo

en Puente Aranda, las concentraciones promedio diarias de PM_{10} estuvieron por encima del valor normativo establecido por la Resolución 601 de 2006, con valores de 65-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es conveniente resaltar que se evidenció una disminución de aproximadamente el 50% de la concentración de PM_{10} durante el paro de transporte ocurrido en el período de monitoreo iniciado en junio de 2005 y finalizado en junio de 2006 [35].

Además de los procesos industriales, el humo del tabaco representa también una fuente de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Slezakova *et al.* [36] realizaron un estudio en dos sitios de Oporto (Portugal), con el objeto de verificar la influencia del humo del tabaco en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$; uno de los sitios estaba influenciado directamente por el humo del tabaco, mientras que el otro sitio no. Se obtuvieron concentraciones diarias promedio de 208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de 190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. Los resultados del estudio mostraron que las emisiones de humo de tabaco incrementaron en un 650% para PM_{10} y en un 720% para $PM_{2.5}$ [36]. En la Tabla II se muestra un resumen de las principales fuentes de emisión, período de monitoreo y cantidad de contaminante de algunos países pertenecientes a Europa, Asia y principalmente Latinoamérica.

COMPOSICIÓN DE PARTÍCULAS RESPIRABLES

Las partículas respirables (PM_{10}) pueden contener metales pesados identificados a través de la caracterización química del material particulado respirable (PM_{10}). Durante un año en la ciudad de Bogotá (Colombia) se determinó que los principales

TABLA II
PRINCIPALES FUENTES ANTROPOGÉNICAS DE PM₁₀ Y PM_{2,5}

Sitio	Principales fuentes	Contaminante	Cantidad (µg/m ³)	Periodo de monitoreo	Referencia
España	- Tráfico vehicular - Actividad industrial	PM ₁₀ anual	41,4	2008	[37]
		PM _{2,5} anual	20,7		
Yokohama, Japón	- Agricultura - Industria automotor - Industria química	PM _{2,5} anual	20,6	Sep. 2007 - Ago. 2008	[29]
		PM _{2,5-10} anual	9,6		
		PM _{>10} anual	5,1		
Taichung, Taiwan	- Actividades agrícolas - Movilización de vehículos	PM _{2,5-10} anual	24,6	Ago. 1999 - Dic. 1999	[26]
		PM _{2,5} anual	58		
Taichung H, Taiwan	- Actividades agrícolas - Movilización de vehículos	PM _{2,5-10} anual	30,31 ± 9,79	Mar. 2004 - Ene. 2005	[27]
		PM _{2,5} anual	54,03 ± 16,92		
Quito, Ecuador	- Resuspensión de polvo - Desgaste de pavimento - Tráfico vehicular	PM ₁₀ anual	22,92 - 45,11	2010	[33]
		PM _{2,5} anual	16,4 - 23,4		
Brasil	- Quema de diesel y carbón - Actividades de granjeras - Refinerías - Fábricas de acero	PM ₁₀ anual	28,18 - 42,31	Nov. 2001 - Nov. 2002	[38]
		PM _{2,5-10} anual fracción gruesa	1,81 - 53,21	Ene. 2005 - Dic. 2005	
		PM _{2,5-10} anual fracción fina	0,25 - 25,98		
Ciudad Heredia, Costa Rica	Flota vehicular	PM ₁₀ anual	>50	Mar. 2006 - Ago. 2006	[39] [40]
			42	May. 2007 - Jun. 2007	
México	Tráfico vehicular	PM ₁₀ anual	129	2011	[41]
		PM _{2,5} anual	28		
Bogotá, Colombia	Quema de diesel	PM ₁₀ anual	59	2010	[42]
Santiago de Chile	- Expansión urbana - Tráfico vehicular	PM ₁₀ anual	80,29 - 52,58	2009	[30]

metales de la zona industrial son Fe y Pb, con concentraciones de hasta 4.000 ng/m³. Metales como Cu, Cr, Zn, Ni, Mn presentaron un rango medio de concentración, de 50 a 700 ng/m³ en Puente Aranda, y menores a 100 ng/m³ en el norte de la ciudad [35].

Por otra parte, en el suroeste de México se encontró que las partículas respirables (PM₁₀) contienen hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP). Amador *et al.* [43]

identificaron 10 hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP) en PM₁₀; el benzo (ghi) perileno, benzo (b) fluoranteno, dibenzo (a,h) antraceno, benzo (a) pireno y fenantreno, son los hidrocarburos de mayor concentración. La cantidad total anual en PM₁₀ fue de (11,6±4,8 ng/m³). Teniendo en cuenta la norma estadounidense NATICH (1992), el promedio anual de benzo (a) pireno adsorbido a PM₁₀ (2,0 ng/m³) rebasó el límite anual propuesto para Arizona de 0,57 ng/m³ [43].

En Brasil también se identificaron hidrocarburos policíclicos aromáticos en PM_{10} , 14 en total, de los que el más abundante fue el Bgp, las concentraciones obtenidas en el estudio se compararon con los límites utilizados en Italia (1 ng/m^3), y se observó que sobrepasaron el límite. En las muestras recolectadas de $PM_{10-2.5}$ y $PM_{<2.5}$, elementos como el silicio, el titanio y el aluminio también mostraron altas concentraciones en las partículas pertenecientes a la fracción gruesa de $PM_{10-2.5}$. De la misma manera las concentraciones de zinc, níquel, cobre y azufre fueron altas en la fracción gruesa de $PM_{10-2.5}$ [38].

Mediciones realizadas sobre muestras de PM_{10} en tres ciudades de Costa Rica (San José, Heredia y Belén) durante mayo y junio de 2007, reportaron que el ión SO_4^{2-} es el más abundante con un valor promedio de $3,4 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Por otro lado, se encontró que los metales que presentaron mayores concentraciones fueron el aluminio, con $427 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, y el hierro, con $474 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. El estudio evidenció diferencias en la composición de PM_{10} de las estaciones monitoreadas; aquellas estaciones influenciadas por alto tráfico vehicular mostraron correlaciones entre $PM_{10} - SO_4^{2-}$, $PM_{10} - NO_3^-$, $NO_3^- - SO_4^{2-}$ y $NH_4^+ - SO_4^{2-}$, mientras que las estaciones ubicadas en zona industrial mostraron correlaciones de $V - SO_4^{2-}$, $Pb - SO_4^{2-}$, $Cr - Al$, $Pb - Mn$, $V - Ni$ y $Pb - Cu$ [40].

En Yokohama, Japón, los principales elementos encontrados en PM_{10} y $PM_{2.5-10}$ fueron nitratos, sulfatos, cloruros, amonio, magnesio y calcio. La composición del material particulado respirable varió de acuerdo con la estación del año. En los resultados mostrados por el estudio se observó que la cantidad de cada uno de los elementos mencionados

anteriormente aumentaba o disminuía en relación con la estación del año [29], [44].

MONITOREO DE PARTÍCULAS RESPIRABLES EN LATINOAMÉRICA

Según el informe presentado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, en Latinoamérica es evidente el mayor avance de algunos países en la temática de monitoreo de partículas respirables; Brasil, Chile y México, por ejemplo, cuentan con capacidad de monitoreo, mientras que países como Guatemala, Nicaragua y Uruguay carecen de programas que se encarguen de crear herramientas que permitan una gestión apropiada de la calidad del aire en las principales zonas de influencia [30], [45]-[46]. No obstante, es preciso reconocer la evolución de países como Argentina y Ecuador en la instalación de redes de monitoreo y en la elaboración de informes que permitan evaluar las concentraciones anuales de material particulado en los centros urbanos [33], [47]. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente elaboró un informe en donde se encuentran las concentraciones promedio anuales de PM_{10} en las principales ciudades latinoamericanas, correspondiente a los años 2000-2007. En la Tabla III se puede observar que las concentraciones más altas se alcanzan en Ciudad de México, Santiago de Chile y Lima Norte. De la misma manera, en la Tabla IV se plasma de forma resumida la normativa utilizada por varios países latinoamericanos y los límites permisibles de material respirable en cada uno de ellos, en contraste con los límites de España y de Yokohama (Japón), regiones pertenecientes a otros continentes.

En la Tabla V se muestra el número de estaciones de monitoreo de las principales ciudades de Brasil, Colombia, Chile, México,

Ecuador y Costa Rica, así como la actualidad de la estación de monitoreo.

TABLA III
CONCENTRACIONES PROMEDIO ANUALES DE PM₁₀ EN CIUDADES LATINOAMERICANAS

Ciudad	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ (µg/m ³)							
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
La Paz					62	67	55	54
Lima Norte		61	49	53	65	75	97	55
Ciudad de México	71	60	62	66	56	56	50	46
Quito					56	57	29	33
San José					46	42	35	46
San Salvador					52	63	52	52
Santiago	77	72	71	74	68	66	71	69
Sao Paulo	52	49	51	48	41	40	40	44

Fuente: [8]

TABLA IV
LÍMITES PARA PM₁₀ Y PM_{2.5} ESTABLECIDOS POR LA NORMATIVA DE CADA PAÍS

País	Contaminante	Valor límite (µg/m ³)	Norma	Referencia
España	PM ₁₀ anual	50	Unión Europea	[18]
Yokohama, Japón	PM _{2.5} anual	15	National Ambient Air Quality Standard (NAAQS)	[29]
	PM _{2.5} 24 h	35		
Colombia	PM ₁₀ anual	50	Resolución 610 de 2010	[48]
	PM ₁₀ 24 h	100		
	PM _{2.5} anual	25		
	PM _{2.5} 24 h	50		
Argentina	PM ₁₀ 24 h	150	Decreto 198/06 reglamentario de la Ley 1356 de Buenos Aires	[49]
	PM ₁₀ anual	50		
Brasil	PM ₁₀ anual	50	CONAMA	[38]
	PM ₁₀ 24 h	150		[50]
Ecuador	PM _{2.5} anual	15	Norma de Calidad de Aire Ecuatoriana (NCAA)	[33]
	PM _{2.5} 24 h	65		
	PM ₁₀ anual	50		
	PM ₁₀ 24 h	150		
Costa Rica	PM ₁₀ anual	50	Decreto 30221-SALUD	[39]
	PM ₁₀ 24 h	150		
Venezuela	PM ₁₀ anual	50	USEPA	[51]
	PM ₁₀ 24 h	150		

>>> Sigue

TABLA IV. CONT.

País	Contaminante	Valor límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Norma	Referencia
México	PM ₁₀ anual	50	NOM-025-SSA1-1993	[52]
	PM ₁₀ 24 h	120		
	PM _{2.5} anual	15		
	PM _{2.5} 24 h	65		
Chile	PM ₁₀ anual	50	D.S. No. 59 Ministerio Secretaría General de la República D.S. No. 12 Norma Primaria de Calidad Ambiental	[53]
	PM ₁₀ 24 h	150		
	PM _{2.5} anual	20		
	PM _{2.5} 24 h	50		

TABLA V

ESTACIONES DE MONITOREO DE LAS PRINCIPALES CIUDADES LATINOAMERICANAS

Ciudad, país	Organismo encargado	Estaciones	Año
Bogotá, Colombia	Secretaría Distrital de Ambiente	La RMCAB cuenta con 13 estaciones que miden PM ₁₀ y PM _{2.5}	2011
Sao Paulo, Brasil	Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (CETESB)	Red Automática de 39 estaciones fijas y 2 móviles que miden PM ₁₀	2010
Santiago, Chile	Comisión Nacional del Medio Ambiente	La Red (MACAM) cuenta con 10 estaciones automáticas de PM ₁₀	2011
México	Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal	La RAMA está integrada por 34 estaciones de monitoreo, 21 en el Distrito Federal y 13 en el Estado de México que miden PM ₁₀	2011
Buenos Aires, Argentina	Agencia de Protección Ambiental	Tres estaciones automáticas para PM ₁₀	2010
Área metropolitana, Costa Rica	Dirección de Gestión de la Calidad Ambiental	5 estaciones fijas para medir PM ₁₀	2010
Quito, Ecuador	Subsecretaría de Saneamiento Ambiental (SSA) del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda	La REMMAQ - Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, 3 estaciones automáticas que miden PM ₁₀	2011

Fuente: [30], [33], [40], [42], [49], [50], [54]

Las altas concentraciones de PM₁₀ contribuyen al incremento de las consultas por enfermedades respiratorias. En Chile los estudios señalan que en diversas urbes, incluida Santiago, la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y broncopulmonares es frecuentemente asociada al incremento de las concentraciones de PM₁₀ [31]. La población anciana es particularmente suscep-

tible a muerte prematura por la presencia de material particulado. Mediciones en el sur de Chile reportaron una relación significativa entre las concentraciones de PM₁₀ y la mortalidad diaria causada por enfermedades respiratorias y cardiovasculares en las personas mayores de 65 años. De la misma manera, estudios desarrollados en Sao Paulo (Brasil) y en ciudad de México indica-

ron que las concentraciones de PM_{10} tienen efectos importantes a corto y mediano plazo sobre la mortalidad de los habitantes de las ciudades monitoreadas [8], [55].

Teniendo en cuenta las afectaciones a la salud de la población, en los distintos países latinoamericanos se han creado una serie de estrategias que ayudan a la reducción de material particulado. En México las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO han arrojado datos muy completos para mejorar el inventario de emisiones, y comprender los impactos regionales y globales por causa de la emisión de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Con base en los resultados las autoridades mexicanas introdujeron un esquema de incentivos para promover vehículos más limpios y eficientes; los nuevos vehículos son eximidos de la prueba de inspección y prueba de mantenimiento de 2,5 a 6 años; esta prueba debe realizarse obligatoriamente a los vehículos cada semestre. Por otro lado, en Curitiba (Brasil), con el ánimo de reducir los tiempos de viaje y el desempeño ambiental del transporte público, se han introducido sistemas de buses rápidos que disminuyen la congestión y la circulación de buses obsoletos responsables del deterioro de la calidad del aire. Este sistema ha sido implementado con buenos resultados en países como Colombia y Argentina [8].

Quito, Cuenca y Guayaquil, son las únicas ciudades ecuatorianas que han incluido políticas de desarrollo ambiental y herramientas de planificación para el monitoreo de la calidad del aire. Estas ciudades cuentan con instituciones dedicadas a la gestión de la calidad del aire y a la elaboración de planes de manejo en la temática, no obstante se carece de un sistema nacional que invo-

lucre a mayor número de actores. Teniendo en cuenta lo anterior, se está en la continua búsqueda de instrumentos orientados a la elaboración de propuestas y estrategias nacionales de gestión de la calidad del aire, tomando como marco referencial la estrategia ambiental para el desarrollo sostenible en el Ecuador [32].

MONITOREO DE PARTÍCULAS RESPIRABLES EN COLOMBIA

En los últimos años se han formulado en el país distintas políticas de prevención de la contaminación del aire, acompañadas de la entrada en vigencia de normativas como la Resolución 610 de 2010 sobre estándares de calidad del aire; Resolución 650 de 2010 sobre protocolo de Monitoreo; Resolución 651 de 2010 sobre la creación del subsistema de calidad del aire SISAIRE; y la Resolución 760 de 2010 sobre protocolo de control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas [56].

Los principales sitios en donde se lleva a cabo el monitoreo continuo de material particulado respirable son Bogotá, Medellín y la región del Valle de Aburrá; ellos cuentan con redes de monitoreo, que incluyen estaciones georreferenciadas con información actualizada en tiempo real. La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. (RMCAB) ubicó 13 estaciones automáticas en puntos estratégicos de la ciudad para monitorear PM_{10} y $PM_{2.5}$; por su parte, la región del Valle de Aburrá instaló 18 estaciones de las que 12 son manuales, 6 automáticas y 3 son automáticas-manuales; además cuenta con 3 estaciones automáticas para medir $PM_{2.5}$ [42], [57]-[58].

Por otro lado, ciudades como Pamplona y Bucaramanga, si bien no cuentan con un sistema de monitoreo tan completo como el de Bogotá y el Valle de Aburrá, tienen interés por conocer las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, y de esta manera tomar medidas de control con respecto a los niveles presentados en estas ciudades; por ello, la Universidad de Pamplona desarrolló un estudio en Bucaramanga, en el que solo en una de las cuatro estaciones utilizadas para el monitoreo de material respirable PM_{10} (estación de Kennedy), se superó el valor anual estipulado por la norma californiana ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un 12%, aproximadamente, probablemente por la presencia de algunas industrias y del tráfico vehicular [59]. Por su parte, en Pamplona un estudio ejecutado por [60] durante el mes de junio de 2005, y realizado a través de nueve monitoreos, evidencia que las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ oscilaron entre 15 y $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que no superaron el límite diario para $PM_{2.5}$ estipulado por la EPA ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$); sin embargo, al realizar la proyección del promedio geométrico de todas las muestras obtenidas, se observó que se sobrepasa el valor establecido por la EPA de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ anual [60].

En Cali los muestreos en dos estaciones (Éxito La Flora y Escuela República de Argentina) durante el período comprendido entre febrero de 2010 - abril de 2011, presentan concentraciones promedio diarias de PM_{10} inferiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores máximos mensuales de $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Éxito La Flora [61]; de la misma manera las mediciones en ciudades como Valledupar y Riohacha no exceden la norma anual para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), re-

gistrando promedios de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Riohacha y $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para Valledupar durante muestreos realizados entre noviembre de 2010 y enero de 2011 [62].

En el informe presentado por la Secretaría de Distrital de Ambiente de Bogotá se muestra de manera más detallada las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las diferentes estaciones localizadas a lo largo de la ciudad; en el informe explican que el comportamiento de PM_{10} estuvo influenciado por el mejoramiento de la calidad del diesel distribuido en el Distrito durante el segundo semestre del año 2008. Las máximas concentraciones anuales se reportaron en las estaciones de Kennedy, Cazucá, Santo Tomás y Corpas, con valores de 99 , 71 , 76 y $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y sobrepasaron el límite de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estipulado por la resolución 601 de 2006. Para $PM_{2.5}$ la concentración anual en la estación de Kennedy fue de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sobrepasando claramente el límite de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual estipulado por la EPA.

En los últimos años se ha logrado una reducción de las concentraciones de PM_{10} . De acuerdo con los resultados de la RMCAB, en el 2007 se obtuvo un promedio anual de $71,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el 2010 el promedio anual disminuyó a $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El control a fuentes móviles a través del programa de autorregulación ambiental, el programa de requerimientos a vehículos con emisiones visibles, el programa de control a concesionarios, la campaña de denuncia "vehículos chimeneas", las auditorías a Centros de Diagnóstico Automotor, la inclusión de un sistema de transporte masivo como Transmilenio, la reducción del contenido de azufre en el diesel (menor a 50 ppm) y los operativos de seguimiento y control en

zonas industriales, constituyen las medidas principales que han reflejado su efecto positivo sobre las concentraciones de material particulado en la capital [42], [57], [62].

En Medellín también se realizan monitoreos continuos de PM_{10} y de $PM_{2.5}$. Echeverry y Maya [63] desarrollaron un estudio entre febrero y octubre de 2007 en 8 puntos, las concentraciones más elevadas para PM_{10} diaria se reportaron en los puntos 1 y 3 (centro de Medellín y Andalucía) con concentraciones de 65 y 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; para $PM_{2.5}$ las máximas concentraciones diarias se presentaron en los puntos 3 y 8 (Andalucía y Belén Los Alpes) con 40 y 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Se observó que en el punto Andalucía se presentaron las concentraciones más elevadas de PM_{10} y de $PM_{2.5}$, no obstante los valores cumplen con la normativa diaria de 150 para PM_{10} y 65 para $PM_{2.5}$ [63].

Los monitoreos realizados en el Valle de Aburrá muestran concentraciones de PM_{10} que sobrepasan en 400% los límites de precaución establecidos por la Organización Mundial de la Salud (15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}). Los valores registrados para PM_{10} varían de 28 a 124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniéndose en promedio 65,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se analizaron los datos primarios recolectados por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire durante el período 2001-2007 [64]. Por otra parte, las concentraciones reportadas por la red de calidad del aire durante el período 2008-2010, muestran una reducción significativa en las concentraciones de PM_{10} , mostrando valores promedio de 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2008, 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2009, y de 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el 2010, en la estación Aguinaga perteneciente a la red de calidad. La tendencia positiva

responde a las diferentes medidas tomadas. Se destaca la disminución del contenido de azufre en el diesel, el uso de tecnologías en transporte limpio como carros y motos eléctricas y la instalación de buses de servicio público de filtros [65].

CONCLUSIÓN

En un mundo globalizado en donde la actividad industrial tiene un rol fundamental en el desarrollo de la humanidad, la calidad del aire es un factor determinante en la estimación de la calidad de vida de las personas. A partir de su medición es posible generar información que permita evaluar los efectos de las emisiones sobre el aire, y así crear estrategias para el control de la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Los estudios citados en el presente artículo coinciden en señalar al tráfico vehicular y a las actividades industriales como las principales fuentes antropogénicas de este tipo de partículas. Eventos resultantes de procesos naturales tales como las erupciones volcánicas y los episodios de polvo sahariano, predominaron como principales fuentes naturales de partículas respirables. Algunos autores coincidieron también en nombrar a los hidrocarburos policíclicos aromáticos, al zinc, al níquel y al cobre como constituyentes del material particulado respirable.

En Latinoamérica, la tendencia es a avanzar en la temática de monitoreo de partículas respirables. A pesar de que países como Guatemala, Nicaragua y Uruguay necesitan mejorar sus técnicas e implementar procedimientos de medición del material particulado respirable, países como México y

Brasil cuentan con herramientas metodológicas para la ejecución de muestreos, red de estaciones ubicadas en los puntos críticos de emisión de estas partículas y programas de monitoreo que permiten la elaboración de políticas encaminadas a la reducción y control de partículas respirables.

En Colombia, las actividades industriales de la región del Valle de Aburrá, y de ciudades como Bogotá y Medellín, incrementan las concentraciones de PM_{10} , sin embargo estas regiones manejan sistemas apropiados y con tecnología de punta que permiten el control del material particulado en la zona, y con ello la búsqueda de alternativas para disminuir las altas concentraciones de partículas registradas en algunos sectores. La mejora de la calidad de los combustibles líquidos, la entrada en vigencia de normativa para controlar las concentraciones de material particulado en el territorio nacional, la inclusión progresiva de programas ambientales a nivel institucional, y el diseño de herramientas de planificación para el transporte público, constituyen un avance importante en el desarrollo de políticas que permitan el mejoramiento de la calidad del aire en estas regiones y la reducción en los últimos años de las concentraciones de PM_{10} . Las ciudades restantes en el territorio colombiano, entre ellas Bucaramanga y Pamplona, continúan mejorando sus técnicas de monitoreo así como el interés por verificar el estado de las partículas respirables.

REFERENCIAS

- [1] Environment Protection Agency - EPA, U. S. *Air Quality Criteria for Particulate Matter* Volume 1. 841p., 2011 [Online] Disponible en: http://www.epa.gov/ncea/pdfs/partmatt/VOL_I_AQCD_PM_3rd_Review_Draft.pdf
- [2] Y. Hurtado y E. Vergara, *Determinación de la variación temporal y espacial de partículas suspendidas totales (PST) utilizando el modelo ISCST*. Santa Marta, 2007, 102 p. [CD-ROM]. Tesis (Ingeniero Ambiental y Sanitario). Universidad del Magdalena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
- [3] C. Herrera, “El sector empresarial y la contaminación urbana en Colombia”. *Revista de Ingeniería*. No. 30, noviembre, 2009, pp. 151-160.
- [4] M. Romero, P. Más, M. Lacasaña, M. Téllez, J. Aguilar y I. Romieu, “Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana”. *Revista Salud Pública de México*. Vol. 46, No. 003, 2004, pp. 222-233.
- [5] F. Muñoz y M. Carvalho, “Efecto del tiempo de exposición a PM_{10} en las urgencias por bronquitis aguda”. *Revista Cad. Saúde Pública*. Vol. 25, No. 003, 2009, pp. 529-539.
- [6] J. Ramos y M. Reyes, “Organizaciones no gubernamentales y la contaminación del aire en la frontera de Baja California, México-California, Estados Unidos. Contexto y desafíos”. *Revista Región y Sociedad*. Vol. 8, No. 037, 2006; pp. 37-84. [Online] Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=10203702>
- [7] R. Rojano, J. Pérez, A. Galindo, Y. Mendoza, D. Soto y E. Toncel. “Determinación del punto de muestreo óptimo, para la evaluación de las concentraciones de Partículas Suspendidas Totales (PST) en una zona

- semiurbana de Colombia”. *Revista Técnica Ingeniería Universidad Zulia*. Vol. 31, No. 3, 2008, pp. 201-212. [Online] Disponible en: <http://www.scielo.org.ve/pdf/rftiu/z/v31n3/art01.pdf>
- [8] Programa de las Naciones para el Medio Ambiente - PNUMA. “Perspectivas del Medio Ambiente: América Latina y el Caribe Geo ALC 3”. 2010, 380p. [Online] Disponible en: <http://www.pnuma.org/geo/geoalc3/Doc%20COMPLETO/GEO%20ALC%203%20WEB%20VERSION%20C.pdf>
- [9] X. Querol, “Congreso Nacional del Medio Ambiente 8. Cumbre del Desarrollo Sostenible. El Material Particulado Atmosférico”. España, 2005, 28p. [Online] Disponible en: http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/AEs/AE9/AE9_doc_XavierQuerol.pdf
- [10] J. Saldarriaga, C. Echeverri y F. Molina, “Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM₁₀) en el Valle de Aburrá, Colombia”. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. No. 032, Diciembre, 2004, pp. 7-16. [Online] Disponible en: <http://148.215.1.166:89/redalyc/pdf/430/43003201.pdf>
- [11] C. López y J. Torres, “Distribución y composición de PM_{10-2.5} y PM_{2.5} en las estaciones de invierno y primavera en un sector de Temuco; y elaboración de un Modelo Predictivo para PM₁₀ en la Estación Invernal Temuco”, Chile, 2007, 115 p. Tesis (Ingeniero Ambiental y Sanitario). Universidad de la Frontera. Departamento de Ingeniería, Ciencias y Administración. [Online] Disponible en: http://dspace.fica.ufro.cl:8080/jspui/bitstream/123456789/442/1/Claudio%20Lopez%20Carrasco_%20Javier%20Torres%20Manriquez.pdf
- [12] Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC. *Material particulado: Las partículas en el control de la contaminación atmosférica*. [Online] Disponible en: <http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=615&catID=362>
- [13] E. Reyes, E. Vega, G. Sánchez, H. Ruiz, y V. Mugica, *Determinación de la contribución de fuentes de emisión de PM_{2.5} a la atmósfera de la zona metropolitana de la ciudad de México*. Programa de Investigación del Medio Ambiente y Seguridad, Instituto Mexicano del Petróleo, 2002. [Online]. Disponible en: <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/mexico13/001.pdf>
- [14] J. Zabalsa, J. Santamaría, A. Alastuey y X. Querol, *Diagnóstico de contribución de fuentes en PM₁₀ en la zona urbana de Altsasu/Alsasua: niveles y composición de PM₁₀*, 2003 [Online]. Disponible en: <http://www.navarra.es/NR/rdonlyres/11881E8D-5B83-4A78-BB8E-281B7AE44E23/132277/RESUMENAlsasua.pdf>
- [15] M. Romero, F. Diego y M. Álvarez, “La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud”. *Rev Cubana Hig Epidemiol*. Vol. 44 No. 2, 2006, pp. 1-14.
- [16] S. Alonso, E. Cuevas, X. Querol, M. Viana and J. Guerra, “Impact of the Saharan dust outbreaks on the ambient levels of total suspended particles (TSP) in the marine boundary layer (MBL) of the Subtropical Eastern North Atlantic Ocean”. *Atmospheric Environment*. Vol. 41, August, 2007, pp. 9468-9480.
- [17] M. Kocak, N. Mihalopoulos and N. Kubilay, “Contributions of natural sources to high PM₁₀ and PM_{2.5} events in the eastern Mediterranean”. *Atmospheric Environment*. Vol. 41, 2007, pp. 3806-3818.

- [18] K. Bouchlaghem, B. Nsom, N. Latrache, and H. Haj Kacem, "Impact of Saharan dust on PM₁₀ concentration in the Mediterranean Tunisian coasts". *Atmospheric Research*. Vol. 92, February, 2009, pp. 531-539.
- [19] X. Querol, A. Alastuey, S. Castillo, S. Alonso, E. Cuevas, y S. Rodríguez, "Impacto de las emisiones desérticas de polvo africano sobre la calidad del aire en España". *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*. Vol. 8, 2008, pp. 22-27.
- [20] S. Rodríguez, X. Querol, A. Alastuey, G. Kallos and O. Kakaliagou, "Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain". *Atmospheric Environment*. Vol. 35, 2001, pp. 2433-2447.
- [21] S. Rodríguez, X. Querol, A. Alastuey and E. Mantilla, "Origin of high summer PM₁₀ and TSP concentrations at rural sites in Eastern Spain". *Atmospheric Environment*. Vol. 36, 2002, pp. 3101-3112.
- [22] X. Querol, *et al.* "Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain". *Science of the Total Environment*. Vol. 334-335, 2004, pp. 359-376.
- [23] R. Martín, *et al.*, "Environmental effects of ashfall in Argentina from the 2008 Chaitén volcanic eruption". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 184, May, 2009, pp. 462-472.
- [24] L. Chan, W. Kwok, S. Lee, and C. Chan, "Spatial variation of mass concentration of roadside suspended particulate matter in metropolitan Hong Kong". *Atmospheric Environment*. Vol. 35, October, 2000, pp. 3167-3176.
- [25] P. Salvador, B. Artiñano, D. Alonso, X. Querol and Alastuey, "Identification and characterization of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods". *Atmospheric Environment*. Vol. 38, 2004, pp. 435-444.
- [26] G. Fang, C. Chang, N. Wang, Y. Wu, V. Wang, P. Fu, C. Cheng, S. Chen, S. and D. Lin, "The study of TSP, PM_{2.5-10} and PM_{2.5} during Taiwan Chi-Chi Earthquake in the traffic site of central Taiwan, Taichung". *Chemosphere*. Vol. 41, February, 2000, pp. 1727-1731.
- [27] G. Fang, Y. Wu, J. Chen, J. Rau, S. Huang, and C. Lin, "Concentrations of ambient air particulates (TSP, PM_{2.5} and PM_{2.5-10}) and ionic species at offshore areas near Taiwan Strait". *Journal of Hazardous Materials*. Vol. B132, 2006, pp. 269-276.
- [28] S. Chang and C. Lee, "Evaluation of the temporal variations of air quality in Taipei City, Taiwan, from 1994 to 2003". *Journal of Environmental Management*. Vol. 86, 2008, pp. 627-635.
- [29] M. Firoz, Y. Shirasuna, K. Hirano and S. Masunaga, "Characterization of PM_{2.5}, PM_{2.5-10} and PM₁₀ in ambient air, Yokohama, Japan". *Atmospheric Research*. Vol. 96, 2010, pp. 159-172.
- [30] H. Romero and D. Opazo, "Ecología política de los espacios urbanos metropolitanos: Geografía de la injusticia ambiental". *Revista Geográfica de América Central Número Especial EGA*, II Semestre, 2011, pp. 1-16.
- [31] A. Cerda y L. García, "Contaminación del aire en la Florida (Talca, Chile): Beneficios económicos en salud por la reducción de los niveles PM₁₀". *Rev Med Chile*. Vol. 138, (Octubre, 2010), pp. 1395-1402.
- [32] V. González, *Expo-Conferencia Interamericana Ambiente, Energía y Desarrollo Sostenible*, Quito 2008, 39p. [Online] Disponible en: <http://www.fnatura.org/boleti>

- nes/expo_conf/ponencias/Vladimir_Gonzalez-La_Calidad_del_Aire_en_Ecuador.pdf
- [33] Secretaría de Ambiente de Quito. *Informe Anual 2010. La Calidad del Aire en Quito*. 2011, 81p. [Online]. Disponible en: <http://www.quitoambiente.gob.ec/home/articulo.php?idArticulo=44>
- [34] A. Gómez, E. Henao, E. Molina, y F. Molina, “Evaluación de las Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas Respirables (PM₁₀) en la zona de Guayabal, Medellín, Colombia”. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. No. 30, Diciembre, 2003, pp. 24-33.
- [35] E. Pachón y H. Sarmiento, “Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia”. *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia* No. 43, Marzo, 2008, pp. 120-133. [Online]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfua/n43/n43a11.pdf>.
- [36] K. Slezakova, D. Castro, M. Pereira, S. Morais, C. Delerue-Matos and M. Alvim-Ferraz, “Influence of tobacco smoke on carcinogenic PAH composition in indoor PM₁₀ and PM_{2.5}”. *Atmospheric Environment*. Vol. 43, 2009, pp. 6376-6382.
- [37] P. Salvador, B. Artinano, M. Viana, X. Querol, A. Alastuey, I. González - Fernández y R. Alonso, “Spatial and temporal variations in PM₁₀ and PM_{2.5} across Madrid metropolitan area in 1999-2008”. *Proceedia Environmental Sciences*. Vol. 4, Enero, 2011, pp. 198-208.
- [38] J. Dallarosa, E. Calesso, L. Meira and F. Wiegang, “Study of the chemical elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric particles of PM₁₀ and PM_{2.5} in the urban and rural areas of South Brazil”. *Atmospheric Research*. Vol. 89, 2008, pp. 76-92.
- [39] J. Herrera, S. Rodríguez y L. Solís, “Determinación de los niveles de partículas PM₁₀ y dióxido de nitrógeno en la ciudad de Heredia, Costa Rica: año 2005-2006”. *Revista Tecnología en Marcha*. Vol. 22, No. 4, Octubre-Diciembre, 2009, pp. 18-27.
- [40] J. Herrera, J. Rojas, S. Rodríguez and A. Báez, “Concentration of PM₁₀ in the Metropolitan Area of Costa Rica, Central America: Chemical composition and potential sources”. *Atmósfera*. Vol. 23, No. 4, Junio, 2010, pp. 307-323.
- [41] Secretaría del Medio Ambiente de México. *Informe Mensual de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México*, Año 9, No. 101, 2011, 3p. [Online] Disponible en: http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca/informes_ejecutivos_simat/informe_ejecutivo-2011MAY.pdf
- [42] Alcaldía Mayor de Bogotá. *Política Distrital de Salud Ambiental para Bogotá D.C. 2011-2023*. 2011, 201p. [Online] Disponible en: <http://www.cempre.org.co/Documentos/Politica%20distrital%20salud%20ambiental.pdf>
- [43] O. Amador, A. Delgado, R. Villalobos, Z. Munive, R. Ortiz, G. Díaz, J. Bravo y S. Gómez, “Partículas suspendidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y mutagenicidad en el suroeste de la ciudad de México”. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 17, No. 004, 2001, pp. 193-204.
- [44] C. Linares y J. Díaz, “Efecto de las partículas de diámetro inferior a 2.5 micras (PM_{2.5}) sobre los ingresos hospitalarios en niños menores de 10 años en Madrid”. *Gac Sanit*. Vol. 23, No. 3, marzo, 2009, pp. 192-197.

- [45] R. Sáenz, *Monitoreo de la calidad del aire en América Latina. Programa de Control de Contaminación del Aire*. 1999, 22p. [Online]. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/monitlac/monitlac.pdf>
- [46] Comisión Ambiental Metropolitana. Programa para mejorar la calidad del aire Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. Anexo 04. 2010, 7p. [Online]. Disponible en: <http://www.paot.org.mx/centro/sma/proaire/anexo04.pdf>
- [47] F. Pérez y D. Allende, "Modelo de calidad del aire para la ciudad de Buenos Aires". *World Congress & Exhibition Engineering 2010-Argentina*. Octubre, 2010, 10p.
- [48] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. Resolución 610 de 2010, por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006. MAVDT. Bogotá, 2010, 4p.
- [49] Agencia de Protección Ambiental Argentina. *Informe trimestral de calidad del aire, cuenca Matanza-Riachuelo, período diciembre 2010 - enero - febrero 2011*. 2011, 34p. [Online]. Disponible en: http://www.acumar.gov.ar/Informes/Control/CalAmb/Abril2011/AIRE/INFORMES/Informe%20CABA/Informe%20GCA-BA_DIC-ENE-FEB%20ACUMAR%202011.pdf
- [50] Governo do estado de São Paulo. *Qualidade do ar no estado de São Paulo*. 2010, 237p. [Online]. Disponible en: <http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-dor/ar/31-publicacoes-e-relatorios>
- [51] L. Escalona, O. Ríos y F. Medina, *Material particulado como PM₁₀ en el aire de la ciudad de Valencia, Venezuela*. 2004, 7p. [Online]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/escalona.pdf>
- [52] Norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-1993 Salud Ambiental. *Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros (PM₁₀) y partículas menores de 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) de la calidad del aire ambiente*. 2005, 11p. [Online]. Disponible en: [http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SSA/Modificaciones/26092005\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SSA/Modificaciones/26092005(1).pdf)
- [53] Algoritmos Servicio de Asesoría en Calidad del Aire y Modelación Atmosférica. *Informe de Resultado Agosto 2011 Campaña de Monitoreo de Material Particulado Mp-10, Mp-2,5 y Meteorología Sector Planta de Lixiviación Minera Las Cenizas Taltal*. 2011, 43p. [Online]. Disponible en: http://seia.sea.gob.cl/archivos/MCA_29-11_08-11_v0.pdf
- [54] SIMAT-Sistema de Monitoreo Atmosférico de México. Red automática de monitoreo Atmosférico - RAMA [en línea]. (2011). Disponible en: <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?option=4&opcionrecursosostecnicos=4>
- [55] H. Pérez, M. Lunagómez y L. Acosta, "Análisis de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas Fracción Respirable (PM₁₀), en Cunduacán, Tabasco". *Rev. Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*. Vol. 26, No. 2, Abril, 2010, pp. 151-162
- [56] Contraloría General de la República de Colombia. *Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente*. 2011, 420p. [Online]. Disponible en: <http://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2011/12/contraloriaestadodelosrecursosnaturales-ydelambiente2010-2011.pdf>
- [57] Secretaría Distrital de Ambiente. *Informe*

- anual de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. Año 2008*. Bogotá, 2009, pp. 14-18. [Online]. Disponible en: <http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/InformeAnual/Informe2008.pdf>
- [58] Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, Mapa de estaciones*. 2010. [Online]. Disponible en: <http://www.metropol.gov.co/aire/contenido.php?id=317>
- [59] A. Quijano, “Promedios geométricos de material particulado fracción respirable (PM_{10}) y detección de metales en el aire de Bucaramanga (Colombia)”. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. Vol. 2, No. 002, Julio-Diciembre, 2004, pp. 21-32.
- [60] A. Quijano y A. Orozco, “Monitoreo de material particulado-fracción respirable ($PM_{2.5}$) en Pamplona (Colombia)”. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. Vol. 3, No. 002, Julio, 2005, pp. 1-11.
- [61] Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente - DAGMA. *Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire para el Municipio de Santiago de Cali*. 2011, 41p. [Online]. Disponible en: <http://grupogesp.org/joomla/docs/svigilancia.pdf>
- [62] R. Rojano, *Concentración promedio y comparaciones de PST , PM_{10} y $PM_{2.5}$ en dos ciudades del Caribe colombiano*. 3^{er} Congreso Internacional Calidad del Aire y Salud Pública. Relación con la movilidad y el transporte sostenible. 2011, 28p. [Online]. Disponible en: <http://www.congresocalidaddelaire.com/wp-content/uploads/2012/01/Concentracion-promedio-y-comparaciones.pdf>
- [63] C. Echeverry y G. Maya, “Relación entre las partículas finas ($PM_{2.5}$) y respirables (PM_{10}) en la ciudad de Medellín”. *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*. Vol. 7, No. 12, Junio, 2008, pp. 23-42.
- [64] J. Bedoya y E. Martínez, “Calidad del aire en el Valle de Aburrá, Antioquia - Colombia”. *Dyna*. Vol. 76, No. 158, Junio, 2009, pp. 7-15.
- [65] Alcaldía de Medellín. Departamento Administrativo de Planeación. Boletín Informativo Medio Ambiente Recursos Naturales. (2011). 7p. [Online]. Disponible en: <http://www.bapp-eafit.info/uploads/docs/Bolet%C3%ADn%20Informativo%20de%20Medio%20Ambiente.pdf>