

RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS PST, PM10 Y PM2.5 EN LA ZONA CARBONÍFERA DEL CESAR (COLOMBIA)

Luis Carlos Angulo Argote*¹, Gloria M. Restrepo Vásquez², Juan Daniel Angulo Argote¹

¹Universidad Popular del Cesar, Grupo GIGEMA-CIDTEC, Bloque A, Oficina 205, Sede Hurtado, Valledupar (Cesar - Colombia).

²Universidad de Antioquia, Grupo Procesos Físico-Químicos Aplicados - PFA, Sede de Investigaciones Universitarias SIU, Laboratorio 328, Medellín (Antioquia - Colombia).

*Tel-Fax (57) 5-5843150 - lcangulo@unicesar.edu.co

RESUMEN

La región minera del Cesar (localizada en el norte de Colombia) es la primera productora de carbón del país, extrae a través del método de minería a cielo abierto alrededor de 35 millones de toneladas. Por esta razón, tiene importantes niveles de emisión de material particulado a la atmósfera. En este trabajo, se tuvieron en cuenta datos de concentración de material particulado menor a 2.5 micras (PM2.5), menor a 10 micras (PM10) y partículas suspendidas totales (PST) durante periodos de hasta doce meses, en varias estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire localizadas en el municipio de La Jagua de Ibirico, el corregimiento de La Loma y la localidad de Plan Bonito y se analizaron los resultados con herramientas estadísticas. Lo que se pretende es relacionar las variables en estudio (PST, PM10 y PM2.5), para determinar las causas, fuentes y rangos más críticos de estos tamaños de material particulado en esta zona minera de Colombia. Los resultados, se soportan en criterios técnicos (estadísticos) más el conocimiento de las características de la zona de estudio.

Palabras Claves: Medidas de posición y dispersión, dependencias lineales, estudio exploratorio, material particulado, contaminación del aire.

Se prefiere presentación oral del trabajo.

1.- Introducción

En Colombia, las autoridades responsables del componente ambiental, han emitido en los últimos 30 años, tres normas relacionadas con la contaminación del aire. Estas reglamentaciones han venido implementando restricciones sobre los límites de material particulado emitido a la atmósfera; el Decreto 02 de 1982, del Ministerio de Salud, permitía $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como norma anual y $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como norma diaria; la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, estableció los límites permisibles (promedio geométrico) para PST en $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) y $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas) y (promedio aritmético) para PM10 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) y $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas) [1]. A partir del 01 de enero de 2011, la Resolución 0610 de 2010 [2] del MAVDT, establece los límites permisibles de PM2.5 (partículas menores a 2.5 micras en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentración); de la misma manera, se restringen los límites de PM10 (partículas menores a 10 micras) y de PST, ver Tabla 1.

Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición	OMS**	EPA-USA***
PST*	100	Anual	60-90	N.D.
	300	24 horas	150-230	N.D.
PM10	50	Anual	20	50
	100	24 horas	50	150
PM2.5	25	Anual	10	15
	50	24 horas	25	65

*Promedio geométrico para PST y aritmético para los demás contaminantes

***Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

**Organización Mundial de la Salud

N.D.=No Disponible

Estas recientes normas sobre límites máximos permisibles, han surgido debido a los problemas de contaminación atmosférica y sus efectos adversos a la salud, sobre todo en las ciudades más importantes del país; tal es el caso de Bogotá y Medellín, en las cuales se han desarrollado trabajos de investigación que apuntan a determinar las consecuencias del material particulado en la calidad del aire, pero aún más importante, las consecuencias epidemiológicas en la población, especialmente la infantil.

En la zona carbonífera del Departamento del Cesar, se han extraído en la última década, alrededor de 300 millones de toneladas y se estima que a partir de 2011 podrían alcanzar a extraerse 60 millones de toneladas cada año; lo cual elevaría sustancialmente los niveles de preocupación en las comunidades cercanas a los proyectos mineros y en las autoridades ambientales por el material particulado que se emitirá a la atmósfera en esa zona de Colombia, teniendo en cuenta que varios estudios epidemiológicos realizados en otras latitudes, han enfatizado que los efectos negativos sobre la salud están principalmente relacionados con el aumento de los niveles de partículas finas (<2.5) en la atmósfera [3-4-5-6]. En ese mismo sentido, algunos estudios han encontrado un aumento significativo de los problemas respiratorios y cardiovasculares en los niveles de contaminantes del aire ambiental, muy por debajo de los estándares establecidos por organismos tales como la EPA de los EE.UU. y la OMS. La contaminación del aire está asociada con grandes aumentos en gastos médicos y morbilidad y se estima que causa alrededor de 800.000 muertes anuales prematuras alrededor del mundo [7].

En esta zona minera, a partir del año 2007, la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) estableció una red de monitoreo de calidad del aire, con 16 estaciones de medición (equipos para monitorear PST y PM₁₀ principalmente); solo dos estaciones, cuentan con equipos para monitorear PM_{2.5} y una para monitorear PM_{1.0}. Este estudio muestra la relación entre los tamaños de partículas PST, PM₁₀ y PM_{2.5} sobre cinco estaciones ubicadas en centros poblados (La Jagua de Ibirico, La Loma y Plan Bonito). Este tipo de estudios pueden ser la base de nuevas investigaciones sobre los efectos en la salud, debido a la contaminación del aire y sobre la importancia de establecer métodos de reducción de contaminantes atmosféricos, los cuales serán muy útiles para los médicos, funcionarios de salud pública, industriales, políticos y comunidad en general.

Las tablas 2 y 3 muestran las relaciones PM_{2.5}/PM₁₀ y PST/PM₁₀ respectivamente, encontradas por varios autores en diversas ciudades y países del mundo. En su gran mayoría reportan estas relaciones en zonas urbanas y rurales y para diferentes periodos de tiempo.

Tabla 2. Relación PM2.5/PM10 en diferentes ciudades y países del mundo

Ciudad (País)	Autor, año	Relación PM2.5/PM10
Tirgu Mures, Romania	Danny Houthuijs, et.al. [8]	0.55
Kedzierzyn Kozle, Poland	Danny Houthuijs, et.al. [8]	0.78
Eastern Mediterranean (Coast)	Mustafa Kocak, et.al. [9]	0.25
Bangkok, Thailand	Nares Chuersuwan, et.al. [10]	0.65
Spain (N,NW, NE and Central)	X. Querol, et.al. [11]	0.6-0.7
Lanzhou, China	Shigong Wang, et.al. [12]	0.26
Agra, India	Aditi Kulshrestha, et.al. [13]	0.4-0.7
Bogotá, Colombia	Rojas y Galvis, [14]	0.45-0.72
Medellín, Colombia	Echeverri y Maya [15]	0.67

Rojas y Galvis [14], habían referenciado otro conjunto de ciudades en las cuales varios autores establecieron relaciones de PM2.5/PM10 entre 0.40 y 0.80.

Tabla 3. Relación PM10/PST en diferentes ciudades y países del mundo

Ciudad (País)	Autor, año	Relación PM10/PST
Switzerland	Ch. Monn, et.al. [16]	0.60-0.75
Beijing, China	L. Yangsheng, et.al. [17]	0.68
Medellin, Colombia	A. Gomez, et.al. [18]	0.62
Medellín, Colombia	M. V. Toro, et.al. [19]	0.62-0.65
USA	Ch. E. Rodes, [20]	0.48
Taipei, China	M. L. Chen, [21]	0.79-0.90
Tirana, Albania	A. Tabaku, et.al. [22]	0.50

2.- Métodos y equipos

Para desarrollar este estudio, se utilizaron los datos de concentración promedio en 24 horas para los años 2008, 2009 y 2010 (hasta mayo) a partir de los monitoreos de PST, PM10 y PM2.5, en 5 estaciones del SEVCAZCC -Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire en la Zona Carbonífera del Cesar- administrado por Corpocesar. Las 5 estaciones

evaluadas son: ZM1 La Loma, ZM2 La Jagua Centro, ZM3 La Loma 2, ZM7 Plan Bonito y ZM9 La Jagua Vía, localizadas en áreas urbanas y en una vía por donde transitan tractocamiones que transportan entre 40 y 50 toneladas de carbón por viaje. Los equipos utilizados en los monitoreos, son medidores de alto volumen (Hi-Vol), secuenciales y analizadores para medición continua de partículas. En la figura 1, se presentan las 16 estaciones que hacen parte de la red de monitoreo.

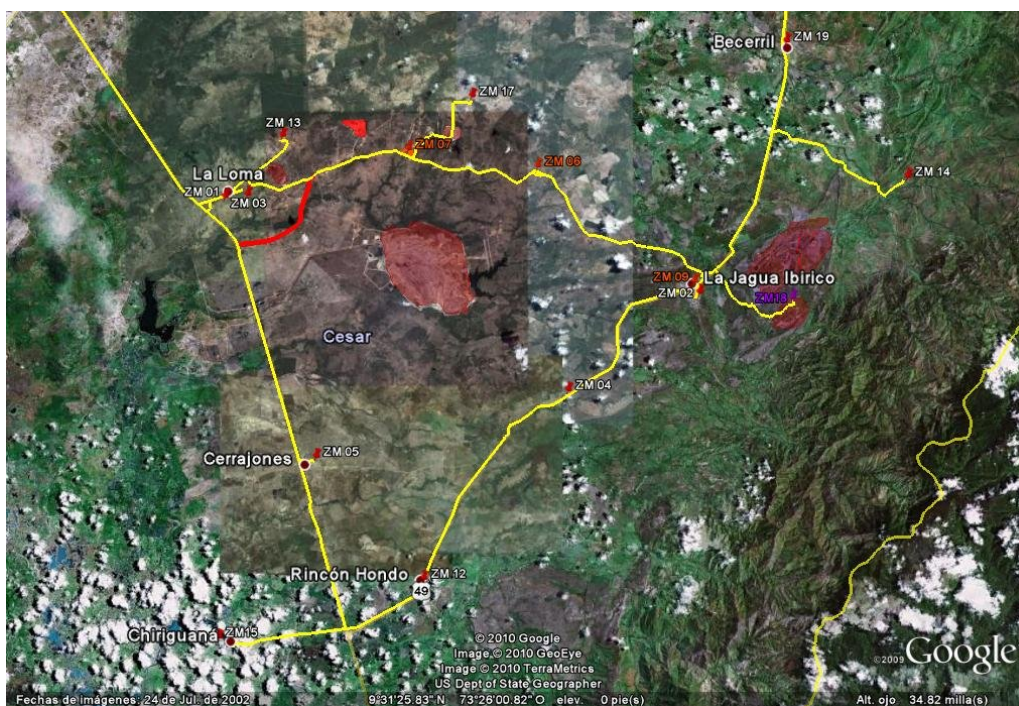


Figura 1. Localización de las estaciones de monitoreo del SEVCAZCC[23].

Se seleccionaron estas 5 estaciones por estar ubicadas en centros poblados y para lograr un primer acercamiento hacia una evaluación completa de las relaciones que se presentan entre los tamaños de particulado que se monitorean en la zona. Inicialmente, se hizo un análisis exploratorio de los datos, lo cual permitió descartar datos atípicos y extremos. Finalmente, a través del uso de herramientas estadísticas se determinaron promedios geométricos y aritméticos, análisis de regresión, coeficientes de correlación, R^2 , ecuaciones de correlación y se hace un análisis de los resultados, soportado en el conocimiento de la zona de estudio.

3.- Resultados y discusión

Los promedios geométricos y aritméticos con sus desviaciones estándar de las concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST, PM10 y PM2.5 para las estaciones estudiadas, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Promedios geométrico y aritmético y desviaciones estándar de las concentraciones de PST, PM10 y PM2.5.

Estación	Variable	P.G. 2008	P.A. 2008	P.G. 2009	P.A. 2009	Desviación Estandar 2008-2009
ZM1	PST	122,46	144,72	106,57	125,87	75.61-72.05
	PM10	34,87	38,98	34,65	38,03	16.88-16.08
ZM2	PST	42,66	48,23	76,75	83,59	24.31-35.14
	PM10	23,09	27,49	33,90	36,78	17.86-14.82
	PM2.5	N.D.	N.D.	14,67	15,60	N.D.-5.15
ZM3	PST	N.D.	N.D.	115,52	137,47	N.D.- 80.50
	PM10	N.D.	N.D.	49,45	56,92	N.D.-30.26
ZM7	PST	220,80	248,32	190,88	220,31	99.28-123.84
	PM10	92,13	102,55	82,24	95,28	40.72-53.61
ZM9	PST	128,93	149,19	144,41	154,29	73.90-59.21
	PM10	84,27	97,63	80,62	85,24	48.01-29.84

P.G.=Promedio Geométrico P.A.=Promedio Aritmético N.D.=No Disponible

Como puede notarse, las estaciones ZM1, ZM7 y ZM9 superan los límites máximos permisibles de PST y la ZM7 y ZM9 para el tamaño PM10, de acuerdo con la norma vigente en Colombia; además, exceden los estándares de referencia de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de la EPA (USA). Una investigación llevada a cabo en el NE de Inglaterra, en un área minera de carbón a cielo abierto arrojó promedios geométricos para PM10 de $17.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las minas y $14.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las poblaciones; así como también calcularon promedios aritméticos de $22.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las minas y $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las áreas urbanas [24]. En otro trabajo realizado en la India [25] se obtuvieron promedios de concentración para PST y PM10 entre $338.8\text{-}799.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $102.5\text{-}425.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el área minera, y $72.3\text{-}497.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40.8\text{-}171.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el área residencial, respectivamente.

Estos valores promedio, muestran una marcada tendencia relacionada con la gran producción de material particulado en zonas mineras de carbón a cielo abierto.

Los resultados estadísticos (coeficientes de correlación, R^2 , ecuaciones de correlación) y las relaciones entre las variables en estudio (PM10/PST y PM2.5/PM10), son presentados para cada estación en la tabla 5 y la tabla 6, respectivamente.

Tabla 5. Resultados estadísticos y relaciones entre las estaciones para PM10/PST

Estación	Relación PM10/PST	R^2	Coefficiente de Pearson
	2008-2009	2008-2009	2008-2009
ZM1	0.30-0.34	80.15-81.79	0.89-0.90
ZM2	0.56-0.45	80.80-81.25	0.89-0.90
ZM3	N.D.-0.43	N.D.-96.85	N.D.-0.98
ZM7	0.43-0.44	84.94-91.70	0.92-0.96
ZM9	0.66-0.56	89.31-87.80	0.94-0.93

N.D.=No Disponible

El análisis de estos valores encontrados, muestra que existe una relación estadísticamente significativa entre PM10 y PST, para un nivel de confianza del 99%, lo cual nos confirma la correlación lineal entre las variables. El estadístico R^2 indica el porcentaje de la variabilidad en PM10. El coeficiente de correlación de Pearson, señala que existe una relación fuerte entre las variables.

Tabla 6. Resultados estadísticos y relaciones entre las estaciones para PM2.5/PM10

Estación	Relación PM2.5/PM10	R^2	Coefficiente de Pearson
	2009-2010	2009-2010	2009-2010
ZM2	0.47-0.44	57.24-84.82	0.76-0.92

Estos datos analizados, evidencian una relación estadísticamente significativa entre PM25 y PM10 para 2009 y 2010, con un nivel de confianza del 99%. Estas variables están linealmente correlacionadas. El estadístico R^2 indica el porcentaje de la variabilidad en PM2.5. El coeficiente de correlación de Pearson, indica una relación entre las variables, que va de moderadamente fuerte en el año 2009 a relativamente fuerte en 2010. En la figura 2,

se muestra de manera gráfica las fuertes correlaciones entre las variables en estudio, por cada año y para cada una de las estaciones.

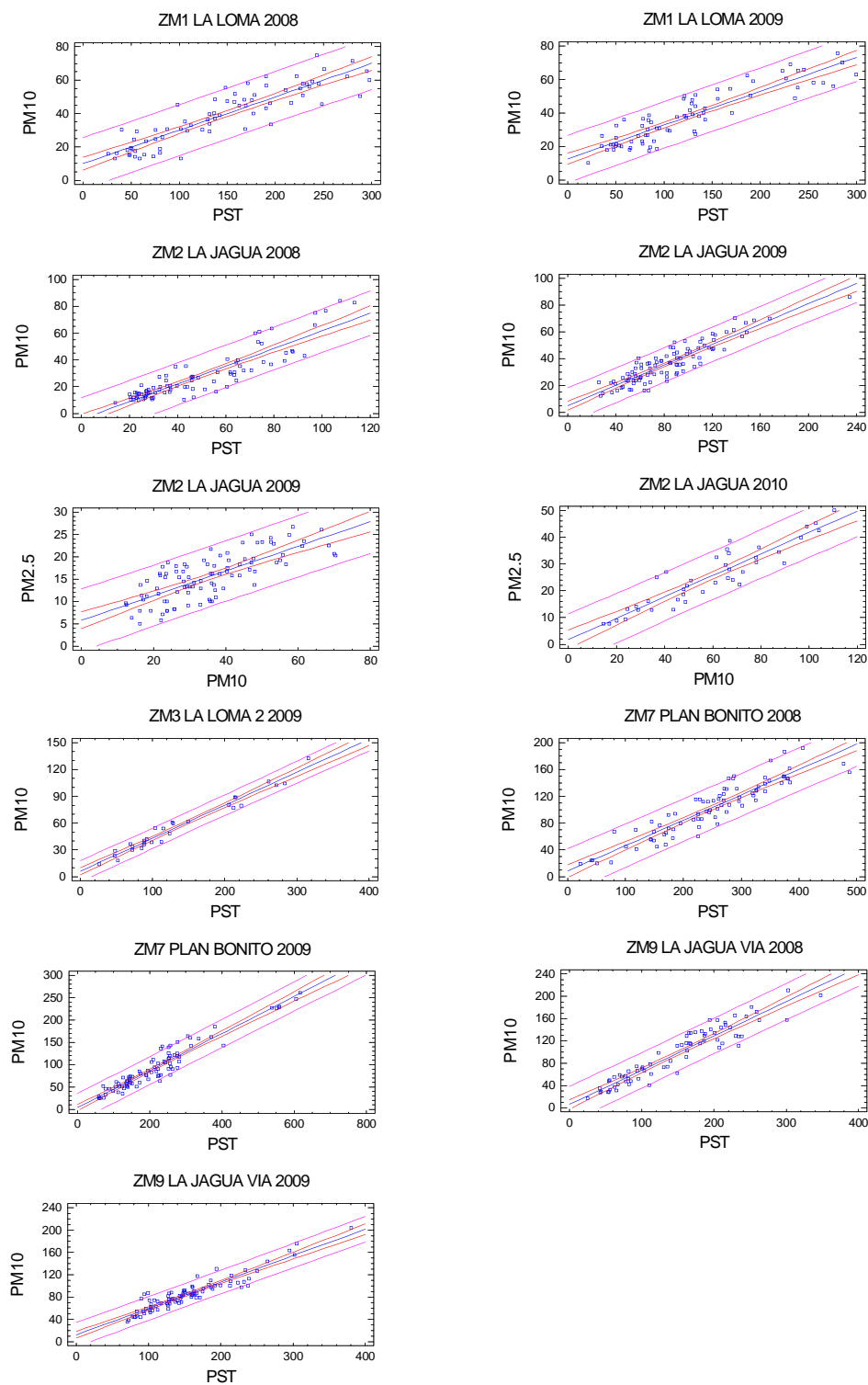


Figura 2. Gráficos de regresión de PM2.5, PM10 y PST para las estaciones en estudio.

4.- Conclusiones

- El comportamiento lineal de las relaciones PM10/PST y PM2.5/PM10 en las estaciones estudiadas permite hacer uso de valores de PST para predecir la concentración de PM10; a su vez, los datos de PM10 pueden ser utilizados para predecir con confianza la concentración de PM2.5, sobre todo a partir de la obligación normativa en Colombia que comienza a regir en 2011 sobre las mediciones de PM2.5. Estas mediciones pueden ser utilizadas para estudiar las relaciones de PM2.5 con la salud de las zonas pobladas cercanas a las áreas de actividad minera.
- Las estaciones ZM1, ZM7 y ZM9 superan los límites máximos permisibles de PST y la ZM7 y ZM9 para el tamaño PM10. Las concentraciones de PM2.5 muestran una tendencia ascendente, si se tiene en cuenta que en 2009 fueron de $14.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el promedio de 2010, hasta mayo, es de $22.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto es motivo de alerta dado que las partículas finas son un mayor riesgo para la salud, especialmente en niños y ancianos.
- Teniendo en cuenta que el volumen de producción de carbón en el Cesar va a seguir en aumento, resulta preocupante que la tendencia de las concentraciones continúe en aumento.
- Las herramientas estadísticas utilizadas, nos ofrecen una mayor claridad sobre la importancia de seguir involucrando otras variables de estudio, tales como dirección y velocidad del viento y precipitaciones, para lograr una mejor comprensión y entendimiento del problema de contaminación por material particulado que existe en esta zona minera.
- Es conveniente instalar monitores de PM2.5 en otras estaciones, para que permitan lograr una distribución más real de las medidas de estas partículas finas.
- Estos resultados, se constituyen en un primer paso para establecer el aporte de fuentes de partículas a la atmósfera, acompañados de una campaña de análisis de caracterización química, lo cual permitirá la aplicación de modelos de receptor.

5.- Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a CORPOCESAR por facilitar el acceso a la información del SEVCAZCC.

6.- Bibliografía

[1] MAVDT de Colombia, Resolución 601, (2006).

- [2] MAVDT de Colombia, Resolución 0610, (2010).
- [3] Dockery, D., Pope, C., Xu, X., Spengler, J., Ware, J., Fay, M., Ferris, B., Speizer, F., 1993. An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England Journal of Medicine* 329, 1753-1759.
- [4] Abbey, D., Nishino, N., McDonnell, W., Burchette, R., Knustsen, S., Beeson, W., Yang, J., 1999. Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in non-smokers. *American Journal of Respiratory Critical Care Medicine* 159, 373-382.
- [5] Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., Fischer, P., Van den Brant, P., 2002. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study.
- [6] Pope, C., Burnet, R., Thun, M., et al., 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 287, 1132-1141.
- [7] Cohen AJ, Ross Alexander H, Ostro B, Pandey KD, Kryzanowski M, Kunzail N, et al. The global burden of disease due to outdoor air pollution. *J Toxicol Environ Health A* 2005; 68: 1-7.
- [8] PM10 and PM2.5 concentrations in Central and Eastern Europe: results from the Cesar study. Danny Houthuijsa, Oscar Breugelmansa, Gerard Hoekb, Eva Vaskovic, Eva Mihalikova, Jozef, S. Pastuszkae, Vitezslav Jirikf, Stela Sachelarescug, Dobrinka Lolovah, Kees Meliefsteb, Evtimia Uzunovah, Carmen Marinescug, Jaroslav Volff, Frank de Leeuwa, Henk van de Wiela, Tony Fletcheri, Erik Lebretea, Bert Brunekreefb. *Atmospheric Environment* 35 (2001) 2757-2771.
- [9] Contributions of natural sources to high PM10 and PM2.5 events in the eastern Mediterranean. Mustafa Kocak, Nikos Mihalopoulosb, Nilgun Kubilaya. *Atmospheric Environment* 41 (2007) 3806-3818.
- [10] Levels and major sources of PM2.5 and PM10 in Bangkok Metropolitan Region. Nares Chuersuwan, Subuntith Nimrat, Sukanda Lekphet, Tida Kerdkumrai. *Environment International* 34 (2008) 671-677.
- [11] Spatial and temporal variations in airborne particulate matter (PM10 and PM2.5) across Spain 1999-2005. X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, M., M. Viana, S. Castillo, J. Peya, S. Rodríguez, B. Artinano, P. Salvador, M. Sánchez, S. Garcia Dos Santos, M.D. Herce Garraleta, R. Fernandez-Patier, S. Moreno-Grau, L. Negral, M.C. Minguillon, E.

Monforte, M.J. Sanz, R. Palomo-Marín, E. Pinilla-Gil, E. Cuevas, J. de la Rosa, A. Sánchez de la Campa. *Atmospheric Environment* 42 (2008) 3964-3979.

[12] A study on variations of concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China. Shigong Wang, Xinyuan Feng, Xiaoqing Zeng, Yuxia Ma, Kezheng Shang. *Atmospheric Environment* 43 (2009) 2823-2828.

[13] Metal concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ particles and seasonal variations in urban and rural environment of Agra, India. Aditi Kulshrestha, P. Gursumeeran Satsangi, Jamson Masih, Ajay Taneja. *Science of the Total Environment* 407 (2009) 6196-6204.

[14] N. Rojas, B. Galvis, *Revista de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes*, N° 22, 54, (2005).

[15] C. Echeverri, G. Maya, *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, Volumen 7, 23, (2008).

[16] Ch. Monn, O. Braendli, G. Schaeppi, Ch. Schindler, U. Ackermann-Liebrich, Ph. Leuenberger, *Atmospheric Environment*, Volume 29, 2565, (1995).

[17] L. Yangsheng, R. Chen, S. Xingxing, M. Xiaoling, *Environment International*, Volume 30, 189, (2004).

[18] A. Gomez, *Revista Facultad de Ingeniería*, N° 30, 24, (2000).

[19] M.V. Toro, A. Marín, *Producción Más Limpia*, Volumen 1, 31, (2006).

[20] Ch. E. Rodes, E. G. Evans, *Atmospheric Environment*, Volume 19, 293, (1985).

[21] M.L. Chen, I.F. Mao, *The Science of The Total Environment*, Volume 209, 225, (1998).

[22] A. Tabaku, G. Bejtja, S. Bala, E. Toci, J. Resuli, *Atmospheric Environment*, Article in Press, 1, (2010).

[23] Corpocesar, *Informes Anuales*, 2007, 2008 y 2009, (2010).

[24] T. Pless-Mulloli, A. King, D. Howel, I. Stone, J. Merefield, *Atmospheric Environment*, 34, 3091, (2000).

[25] S. K. Chaulya, *Journal of Environmental Management*, Volume 70, 1, (2004).

[26] M. Akyüz, H. Cabuk, *Journal of Hazardous Materials*, 170, 13, (2009).