

# RELACIÓN PARTICULAS RESPIRABLES (PM<sub>10</sub>)/ PARTICULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) EN SANTA MARTA (COLOMBIA)

## BREATHABLE PARTICULATE MATTER (PM<sub>10</sub>) AND TOTAL SUSPENDED PARTICLES (TSP) RATIO IN SANTA MARTA (COLOMBIA)

SARA CANDANOZA

*Ing. Ambiental Universidad del Magdalena, saracandanoza@gmail.com*

LUIS GORIBAR

*Ing. Ambiental Universidad Autónoma Metropolitana México, goribar.luis@gmail.com*

FRANCISCO GARCÍA

*M.Sc. Ing. Ambiental, Universidad del Magdalena, Docente, fgarcia@unimagdalena.edu.co*

Recibido para revisar Agosto 18 de 2012, aceptado Abril 26 de 2013, versión final Abril 29 de 2013

**RESUMEN:** Se determinó la concentración de partículas respirables (PM<sub>10</sub>) y partículas gruesas (PST) en el aire de Santa Marta. El análisis espacial y temporal de la relación PM<sub>10</sub>/PST permitió diferenciar las zonas de la ciudad y las épocas del año con variación en la concentración de estos dos parámetros. Se reportan valores críticos de calidad del aire en la estación Zaleza donde para PM<sub>10</sub> se encontró que el 83 % de las muestras tomadas violan la norma diaria de PM<sub>10</sub>.

**PALABRAS CLAVE:** PM<sub>10</sub>, PST, relación PM<sub>10</sub>/PST

**ABSTRACT:** Breathable (PM<sub>10</sub>) and coarse (TSP) particulate matter concentration in air of Santa Marta was determined. The spatial and temporal analysis of PM<sub>10</sub>/PST ratio showed different areas and months with variation in the concentration of these parameters. Critical values are reported at Zaleza station where PM<sub>10</sub> concentration exceeds the daily limit in 83% of the samples collected.

**KEYWORDS:** PM<sub>10</sub>, PST, PM<sub>10</sub>/PST ratio

### 1. INTRODUCCIÓN

Santa Marta, una ciudad con vocación turística, enfrenta problemas de violación de los niveles permitidos de la concentración de partículas [1]. Entre las fuentes a las cuales se les atribuye la disminución de la calidad del aire, se encuentran el tráfico automotor urbano, caracterizado por el auge del mototaxismo y el aumento del número de vehículos particulares; el manejo del carbón mineral, dados los volúmenes de éste, que son exportados desde cuatro puertos ubicados en la zona costera de Ciénaga y Santa Marta, además del aerosol marino y el polvo resuspendido por el viento desde los cerros denudados que bordean la ciudad. La creciente actividad industrial y portuaria es de gran interés sanitario pues a ésta se le atribuye en buena parte las alteraciones de la calidad del aire allí registradas, como consecuencia directa de las actividades de transporte, acopio, manejo en puertos y exportación de carbón

mineral. El transporte de éste se realiza desde las minas a los puertos en tractocamiones y tren, impactando a su paso zonas pobladas del **área** urbana.

Diversos estudios epidemiológicos han indicado una fuerte asociación entre concentraciones elevadas de partículas respirables (PM<sub>10</sub>) y un incremento en los niveles de mortandad y morbilidad [2, 3-8]. El material particulado **sólo** o en combinación con otros contaminantes, especialmente el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), representa un grave riesgo para la salud, ya que las partículas menores de 10µm penetran directamente por las vías respiratorias y ocasionan alteraciones en este sistema [8, 9].

La relación PM<sub>10</sub>/PST permite valorar la composición de las partículas por tamaño y su presencia en la atmósfera. El tamaño de las partículas tiene una íntima relación con el proceso de formación de las mismas [9]. Las grandes son a

menudo de origen natural producidas por procesos mecánicos tales como la erosión del suelo. Por otro lado, las partículas más pequeñas son principalmente de origen antropogénico, emitidas en la combustión y se forman por condensación y coagulación [10]. Gómez, et. al. [9] reportaron relaciones  $PM_{10}/PST$  promedios de 0.62 en Medellín (Col.) en el año 2000. Para este estudio, el análisis de los datos demostró que los valores de  $PM_{10}$  son explicados en un 91% por los valores de PST, mostrando una relación fuerte entre estos dos parámetros. Saldarriaga, et al. [10] en un estudio paralelo, encontraron relaciones  $PM_{10}/PST$  entre 0.527 y 0.813 en el Valle de Aburrá (Col.). Estos investigadores reportaron valores del coeficiente de correlación de 0.98 [10]. Un estudio realizado en Suiza demostró que la relación  $PM_{10}/PST$  varió desde 0.6 hasta un 0.75 [11]. La red Nacional de Vigilancia de la Contaminación del Aire (NAPS) de Canadá realizó un estudio similar encontrando una relación  $PM_{10}/PST$  promedio de 0.44 para 19 ciudades de este país. [12]. Todas estas investigaciones demuestran que las relaciones altas de  $PM_{10}/PST$  se dan en las áreas urbanas con mayor contaminación.

Pese a la creciente preocupación sobre las alteraciones de la calidad del aire en Santa Marta, no se ha estudiado aun la relación  $PM_{10}/PST$ . Este artículo presenta los resultados de una investigación dirigida a conocer los

valores de dicha relación en esta ciudad, uno de los principales destinos turísticos del País.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 Área de estudio

La ciudad de Santa Marta bordea el sector oriental de la bahía que lleva su nombre. Está situada entre los  $11^{\circ}14'50''$  de Latitud Norte y los  $74^{\circ}12'06''$  de Longitud Occidental, a una altura de 6 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). Posee un clima cálido y seco, con precipitación media anual de 362 mm, humedad relativa de 77% y rango de temperatura entre los  $23-32^{\circ}C$ . Las lluvias siguen un patrón monomodal, con precipitaciones concentradas en los periodos de junio-julio y septiembre-octubre y un período seco de diciembre a abril, con variaciones debidas a fenómenos locales [1]. Para el monitoreo de la concentración de partículas, se ubicaron cinco estaciones, Almendro, Unimag, Zaleza, Curinca y Espa, la localización de las mismas se puede apreciar en la Figura 1. Las muestras fueron colectadas entre enero de 2009 y julio 2010 para un total de 118 muestras de PST y 118 de  $PM_{10}$ .

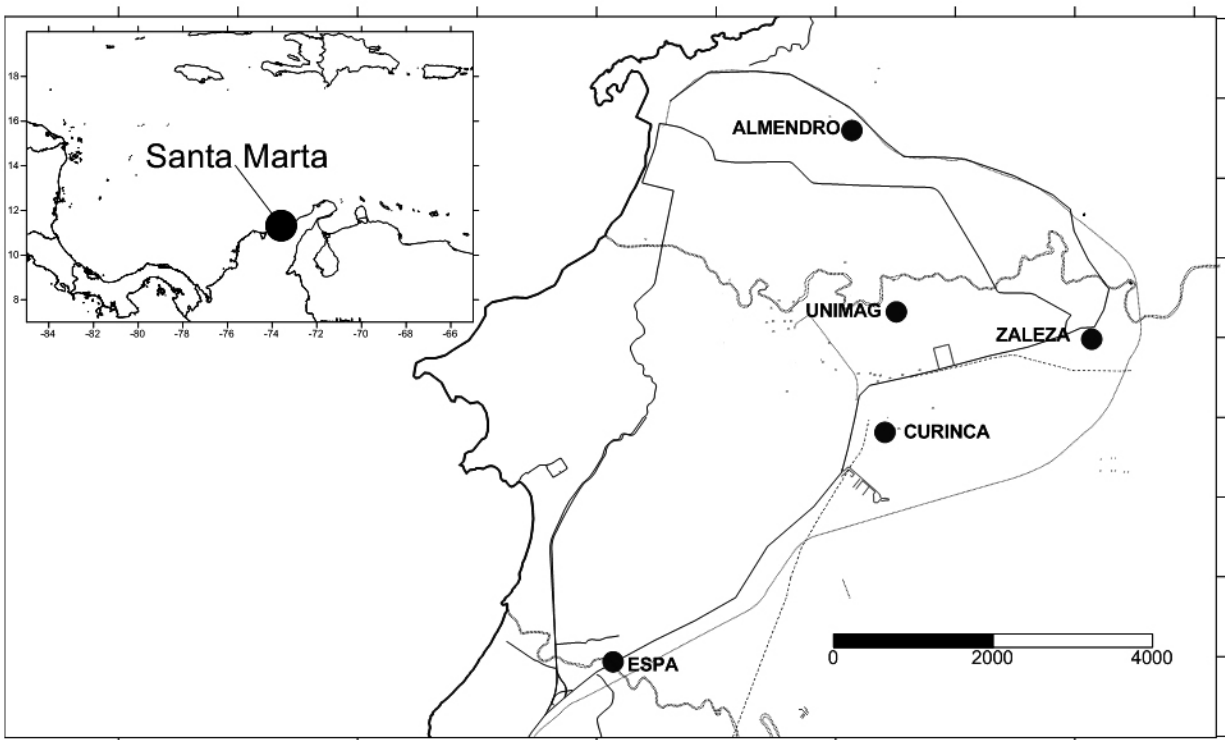


Figura 1. Localización del área de estudio.

## 2.2 Método de muestreo

Se utilizaron muestreadores de alto volumen Hi-Vol S300 (Ecotec), de función programable para el control electrónico del flujo que permite el control volumétrico de la colección de la muestra con caudales en el rango 45 - 96 m<sup>3</sup>/h. Las especificaciones de estos equipos consulta los protocolos y normas de monitoreo para PST y PM<sub>10</sub> del estándar Australiano y cuenta con aprobación de la EPA para la determinación de partículas (RFPS-0706-162). Siguiendo el estándar EPA 40 CFR Pt. 50 App. B y J, se colectaron muestras cada tercer día, en periodos de muestreo de 24 horas, en filtros de fibra de cuarzo y de vidrio para PM<sub>10</sub> y PST respectivamente. Los mismos fueron pesados antes y después de la colección de material particulado. La concentración de partículas suspendidas en el aire se calculó dividiendo la masa de partículas colectadas en el filtro y el volumen de aire muestreado durante 24 horas, la misma se expresó en µg/m<sup>3</sup>.

## 2.3. Análisis

Se efectuaron correlaciones espaciales y temporales de los datos usando análisis espacial y de series de tiempos respectivamente [10-11]. Los cálculos matemáticos se hicieron con Matlab 7.0 (MathWorks) y Excel 2003 (Microsoft Office), mientras que los estadísticos se procesaron con Statgraphics XV (StatPoint). Los valores medios ( ) fueron determinados como media geométrica y aritmética para PST y PM<sub>10</sub>

respectivamente, igualmente fueron definidos, los máximos (MAX), mínimos (MIN) y las veces que la concentración supera el valor límite máximo en 24 horas para cada parámetro (EXCEDENCIA). La estructura espacial de los datos fue ilustrada con el método de *gridding* usando el software SURFER 9. La asociación espacial y temporal fue determinada mediante el análisis de conglomerado Cluster, mientras que las principales causas de variación se analizaron con la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP).

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Resultados de mediciones

En la tabla 1 se presentan el resumen estadístico de las mediciones de PST y PM<sub>10</sub> para el periodo de estudio.

Para PST la máxima concentración observada fue de 381 µg/m<sup>3</sup> en ZALEZA mientras que la mínima (40.32 µg/m<sup>3</sup>) ocurrió en ESPA. Se reportaron 10 excedencias a la concentración máxima diaria permisible (300 µg/m<sup>3</sup>), todas ellas en la estación ZALEZA. Para PM<sub>10</sub> la máxima concentración observada fue de 456 µg/m<sup>3</sup> y la mínima de 16 µg/m<sup>3</sup>, ambas en la estación ZALEZA. La concentración máxima diaria permisible (100 µg/m<sup>3</sup>) fue excedida en 98 ocasiones, 90 de ellas en la estación ZALEZA y las restante en la estación ESPA. La variación espacial de las concentraciones promedio de PST y PM<sub>10</sub> registradas en el periodo de muestreo se presenta en las figuras 2 y 3 respectivamente.

**Tabla 1.** Resumen concentraciones PST y PM<sub>10</sub>

ESTACIÓN	ESTADÍSTICO	PST	PM <sub>10</sub>
ZALEZA	± D.E.	205.34 ± 56.20	141.29 ± 72.63
	MAX - MIN	381 - 119	456 - 16
	EXCEDENCIA	10	90
CURINCA	± D.E.	119.90 ± 42.10	47.40 ± 15.57
	MAX - MIN	223 - 58	88 - 18
	EXCEDENCIA	0	0
ESPA	± D.E.	129.33 ± 40.32	62.57 ± 20.28
	MAX - MIN	298 - 90	114 - 26
	EXCEDENCIA	0	8
UNIMAG	± D.E.	120.28 ± 44.75	50.70 ± 16.46
	MAX - MIN	264 - 45	86 - 21
	EXCEDENCIA	0	0
ALMENDRO	± D.E.	124.72 ± 36.87	28.00 ± 16.86
	MAX - MIN	233 - 59	98 - 21
	EXCEDENCIA	0	0

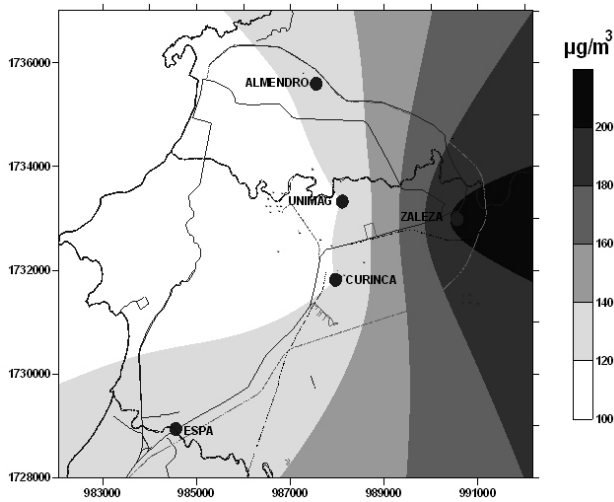


Figura 2. Concentración promedio (media geométrica) de PST en el área urbana de Santa Marta (Julio 2009 – Julio 2010)

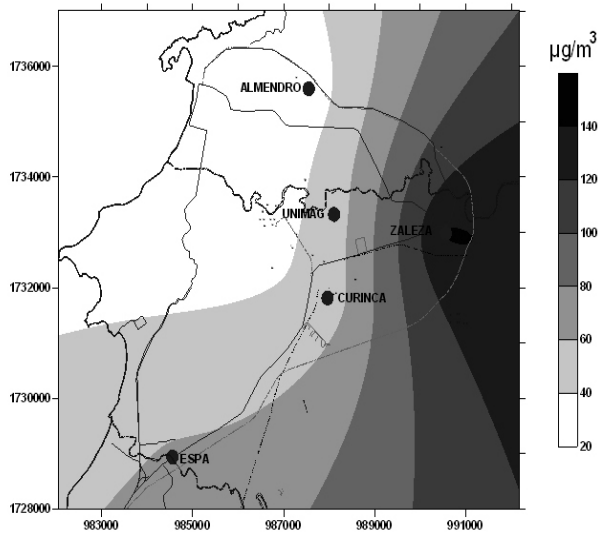


Figura 3. Concentración promedio (media aritmética) de PM<sub>10</sub> en el área urbana de Santa Marta (Julio 2009 – Julio 2010)

### 3.2 Relación PM<sub>10</sub>/PST

La relación fluctuó entre 0.179 y 0.740. Estos dos valores extremos ocurrieron en Zaleza, lo que confirma la alta variabilidad de los datos colectados en esta estación. En la Tabla 2 se presenta la información de la relación PM<sub>10</sub>/PST en cada estación. El promedio espacial (5 estaciones) y temporal (12 meses) para la relación PM<sub>10</sub>/PST fue de 0.477. En el criterio espacial, la estación Zaleza mostró los valores más altos de la relación (0.583) seguida en orden descendente por ESPA (0.486), Almendro (0.470), Unimag (0.429) y finalmente Curinca donde se registró el valor más

bajo (0.415). Agosto con 0.533 resultó ser el periodo mensual con el máximo valor de relación PM<sub>10</sub>/PST reportado.

### 3.3 Variación espacial de la relación PM<sub>10</sub>/PST

Al usar el análisis cluster (Figura 4) para determinar la asociación con criterio espacial para la relación PM<sub>10</sub>/PST se observan dos grupos, el primero contiene a la estación ZALEZA mientras que en el segundo se encuentran las restantes 4 estaciones. Este análisis demuestra la diferencia espacial entre estaciones con concentraciones altas y una alta relación PM<sub>10</sub>/PST, frente a estaciones que registran concentraciones más bajas y uniformes.

Tabla 2. Relación PM<sub>10</sub>/PST

MES	PM <sub>10</sub> /PST				
	ZALEZA	CURINCA	ESPA	UNIMAG	ALMENDRO
Enero	0.740	0.293	0.442	0.554	0.412
Febrero	0.695	0.343	0.447	0.391	0.417
Marzo	0.608	0.369	0.474	0.393	0.509
Abril	0.483	0.408	0.489	0.509	0.475
Mayo	0.604	0.371	0.346	0.368	0.448
Junio	0.179	0.566	0.693	0.555	0.553
Julio	0.390	0.423	0.649	0.502	0.614
Agosto	0.687	0.536	0.538	0.416	0.484
Septiembre	0.626	0.431	0.331	0.328	0.480
Octubre	0.703	0.452	0.425	0.246	0.379
Noviembre	0.665	0.438	0.435	0.427	0.450
Diciembre	0.620	0.352	0.568	0.457	0.415

### 3.4 Variación temporal de la relación PM<sub>10</sub>/PST

El análisis de asociación temporal muestra que existen dos periodos diferentes en el año con respecto a la relación PM<sub>10</sub>/PST (Figura 5). El primer período

comprende épocas ya sea de lluvia o de vientos fuertes donde las concentraciones tanto de PST como de PM10 tienden a ser más bajas. El otro período, entre junio y julio, es considerado un período de transición entre épocas de lluvia y sequía en el que las concentraciones no son afectadas por la lluvia o dispersadas por el viento.

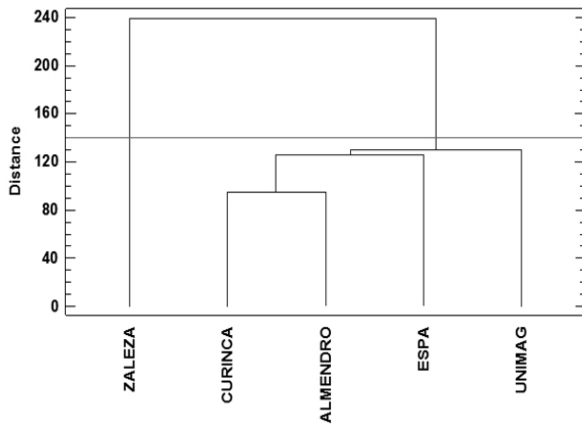


Figura 4. Asociación espacial de estaciones

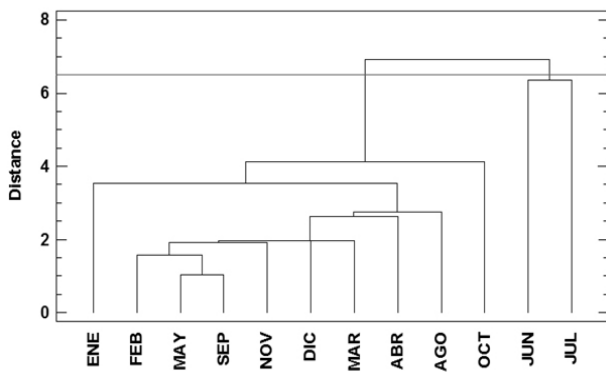


Figura 5. Asociación temporal de PM<sub>10</sub>/PST

La variación espacio temporal de la relación PM<sub>10</sub>/PST se presenta en la figura 6. Para cada mes del año se diferencian las áreas de la ciudad que presentan relaciones PM<sub>10</sub>/PST menores a 0.5 y mayores a este valor. Para su estimación se usó la interpolación de krigin simple.

Con respecto a la composición del 50 % PM<sub>10</sub>/PST se confirma la existencia de dos periodos y dos zonas diferenciales. En lo referente al criterio temporal,

los meses de junio y julio se diferencian del patrón mostrados por los restantes meses del año. En estos dos meses, los valores inferiores a 0.5 en la relación PM<sub>10</sub>/PST se encuentran al este de la ciudad en los sectores coincidentes con la troncal del Caribe y la vía alterna al puerto.

El resto del año la situación se invierte quedando esta zona como la de mayor relación PM<sub>10</sub>/PST. En este sector existe un alto tráfico vehicular dada la circulación de automotores hacia el puerto, Barranquilla y Rio Hacha, con un flujo de vehículos que se ha llegado a estimar hasta de de 1220 por hora. El comportamiento espacial muestra, al igual que el temporal, dos áreas diferenciables entre los valores que superan o no el 50 % en la relación PM<sub>10</sub>/PST.

### 3.5 Influencia de los parámetros meteorológicos

Para estudiar las posibles causas de variación se sometieron los datos de los muestreos, tanto de PST como de PM<sub>10</sub>, conjuntamente con las variables meteorológicas, a un análisis de componentes principales (ACP). El análisis ACP para PST en Zaleza mostró que el 64.76% de la variación de los datos puede explicarse mediante el uso dos componentes principales.

El componente principal uno (CI), explica el 35.12 % de la variación y está asociado a días calurosos, con abundante brillo solar y evaporación, o días con alta humedad relativa o lluviosos. El componente principal dos (CII), explica el 16.53 % de la variación en esta estación y está asociada, además de las diferencias entre días lluviosos y secos, con la dirección y velocidad del viento (Figura 7).

Un comportamiento similar al mostrado por la estación Zaleza se presenta en las restantes estaciones con respecto a la influencia de las variables meteorológicas sobre la variación de los datos colectados. El resumen de este análisis, es decir, la influencia de las variables meteorológicas sobre la variabilidad de las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub>, se presenta en la tabla 3. En ésta, se puede observar que los dos componentes determinados conservan un peso uniforme para explicar las causas de variación

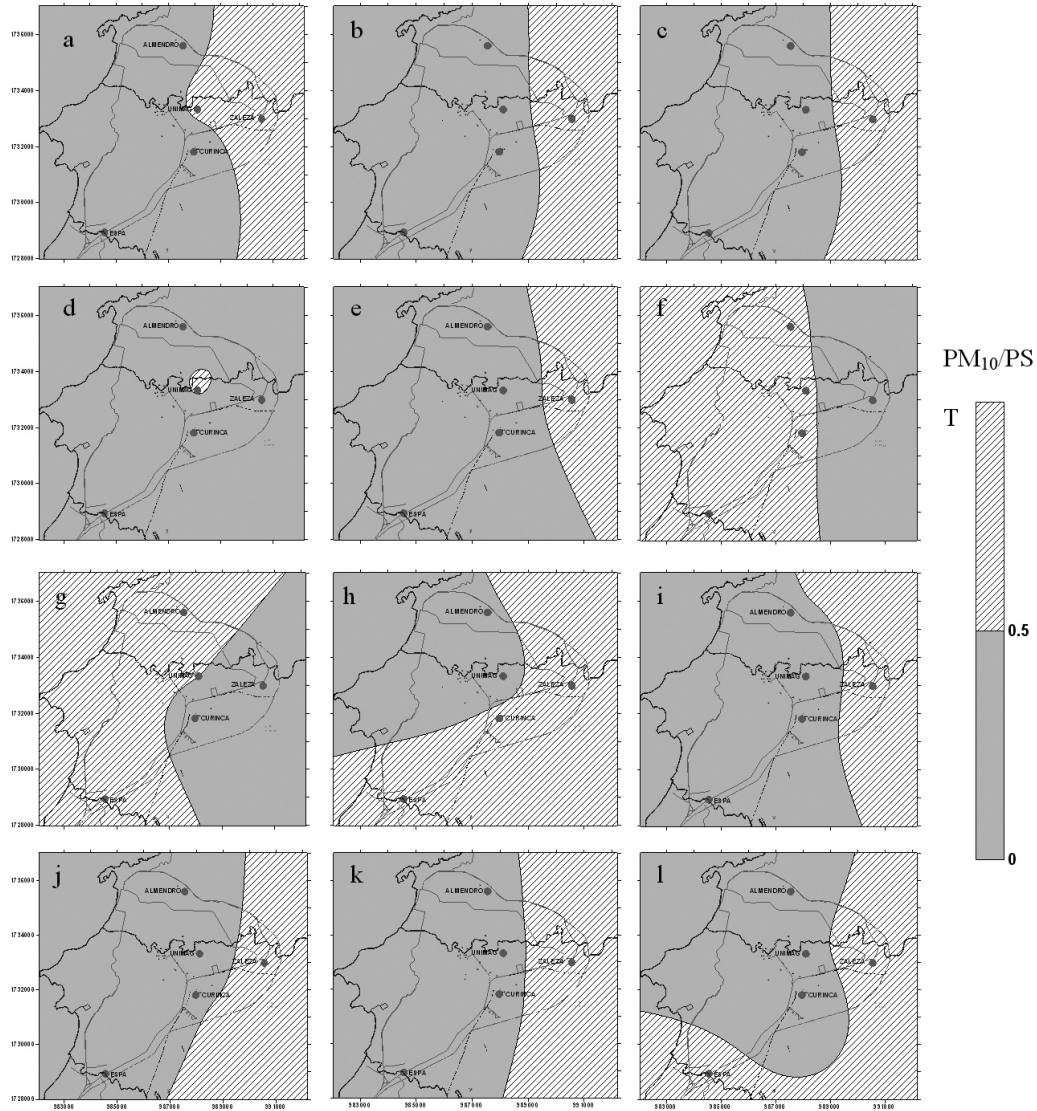


Figura 6. Variación espacio temporal de la relación de  $PM_{10}/PST$  en Santa Marta (a. enero; b. febrero; c. marzo; d. abril; e. mayo; f. junio; g. julio; h. agosto; i. septiembre; j. octubre; k. noviembre; l. diciembre).

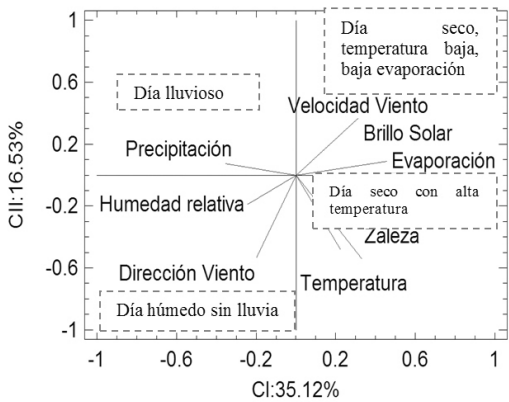


Figura 7. Análisis de componentes principales de la estación ZALEZA (EM01), datos PST.

Tabla 3. Análisis de componentes principales

Estación	PST		PM10	
	CI	CII	CI	CII
Zaleza	35.12	16.53	34.10	16.23
ESPA	29.12	15.97	34.22	15.26
Almendros	28.87	17.08	34.63	15.26
Curinca	29.75	16.37	34.14	15.22
Unimag	29.27	17.08	35.33	16.24

#### 4. DISCUSIÓN

Una forma de definir la contribución de las actividades urbanas y económicas al aumento de los niveles de

material particulado en la atmosfera local, es entre otras, la estimación de los diámetros de las partículas. Santa Marta carece de un inventario de emisiones a la atmósfera, sin embargo, entre las fuentes que favorecen la alteración de la concentración de las partículas gruesas en el aire en Santa Marta, se contemplan el manejo de carbón (hasta 55 millones de toneladas al año) y la resuspensión de material desde el suelo por la acción del viento o la circulación de vehículos en las vías. El relieve del área urbana de la ciudad cuenta con abundantes cerros y promontorios con escasa vegetación y alto grado de ocupación por invasiones que afectan la estabilidad de los suelos y contribuye a que se presente abundante arrastres del mismo hacia las zonas bajas durante los episodios de precipitación. El material acumulado en las vías es resuspendido por el tránsito vehicular o el viento, afectando la calidad del aire local.

En las áreas donde predominan las partículas gruesas se esperan relaciones  $PM_{10}/PST$  por debajo de 0.5 como se presentó en las estaciones Almendros, UNIMAG, Curinca y ESPA la mayor parte del año. La relación  $PM_{10}/PST$  supera el valor de 0.5 sólo en los meses de junio y julio para este grupo de estaciones.

Los valores de relación  $PM_{10}/PST$  superiores a 0.5 se encuentran asociados a las zonas de la ciudad con mayor tráfico vehicular. Los valores de  $PM_{10}$  superan los niveles de precaución internacional ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y excede las directrices que traza la Organización Mundial de la Salud, en la cual se proclama la necesidad de no rebasar los  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la exposición prolongada [13].

## 5. CONCLUSIONES

La relación  $PM_{10}/PST$  presentó valores máximos y mínimos de 0.179 y 0.740 respectivamente entre enero de 2009 y julio 2010. Los registros encontrados en este estudio demuestran una alta variabilidad de las fuentes y su combinación; situación que se refleja en las fluctuaciones de los registros de  $PM_{10}$  y PST.

La determinación de esta relación permite establecer diferencias entre áreas dentro de la ciudad de Santa Marta. Las zonas cercanas a las vías Troncal del Caribe y Vía alterna presentan los valores más altos de esta relación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y la Universidad del Magdalena por la financiación brindada para la ejecución de este estudio.

## REFERENCIAS

- [1] Garcia, F.F., Agudelo, R.A. y Jiménez, K.M., Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia, Revista Facultad Nacional de Salud Pública, 24, pp. 73-82, 2006.
- [2] Gupta, A.K., Karar, K. and Srivastava, A., Chemical mass balance source apportionment of  $PM_{10}$  and TSP in residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India, Journal of Hazardous Materials, 142, pp. 279–287, 2007.
- [3] Arditoglou, A. and Samara, C., Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: a source identification and apportionment study, Chemosphere, 59, pp. 669–678, 2005.
- [4] Lin, J.J. and Lee, L.C., Characterization of the concentration and distribution of urban submicron ( $PM_1$ ) aerosol particles, Atmos. Environ., 38, pp. 469–475, 2004.
- [5] Namdeo, A. and Bell, M.C., Characteristics and health implications of fine and coarse particulates at roadside, urban background and rural sites in UK, Environ. Int. 31, pp. 565–573, 2005.
- [6] Perez, P. and Reyes, J., Prediction of maximum of 24-h average of  $PM_{10}$  concentrations 30 h in advance in Santiago, Chile, Atmospheric Environment, 36, pp. 4555–4561, 2002.
- [7] Pope, C.A., Review: epidemiological basis for particulate air pollution health standards, Aerosol Sci. Technol., 32, pp. 4–14, 2000.
- [8] Querol, X., *et al.* Speciation and origin of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in Spain, J. Aerosol Sci., 35, pp. 1151–1172, 2004.
- [9] Gómez, A., Henao, y Molina, F., Evaluación de las partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables ( $PM_{10}$ ) en la zona de Guayabal, Medellín, Colombia, Revista Facultad de Ingeniería, 30, pp. 24–33, 2003.

[10] Saldarriaga, J.C., Echeverri, C.A. y Molina, F.J., Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM10) en el Valle de Aburrá, Colombia, Revista Facultad de Ingeniería, 32, pp. 7-16, 2004.

[11] Monn, C.H., Braendli, O., *et al.* Particulate matter <10 $\mu$ m (PM10) and total suspended particulates (TSP) in urban, rural and alpine air in Switzerland, Atmospheric Environment, 29, pp. 2565 – 2573, 1995.

[12] Brook, J.R., Dann, T.F. and Burnett, R.T., The relationship among TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and inorganic constituents of atmospheric particulate matter at multiple Canadian locations, Journal of the Air & Waste Management Association, 47, pp. 2 – 19, 1997.

[13] Bedoya, J., Martínez, E., Calidad del aire en el Valle de Aburrá Antioquia –Colombia, Dyna, 158, pp. 7-15, 2009.