

## CONCENTRACIÓN Y RELACIÓN DE PST, PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub> EN POBLACIONES CERCANAS A MINERÍA A CIELO ABIERTO: CASO CERREJÓN COLOMBIA

ROBERTO ROJANO <sup>1,2</sup>, LUIS ANGULO <sup>1,2</sup>, GLORIA RESTREPO <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de La Guajira, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación GISA. email: rrojano@uniguajira.edu.co

<sup>2</sup> Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados. email: gloma@udea.edu.co

Recibido: octubre 2014

Recibido en forma final revisado: julio 2015

### RESUMEN

Muestras de PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> y partículas suspendidas totales (PST) fueron recogidas entre enero y junio de 2012 en la Mina a cielo abierto el Cerrejón, al norte de Colombia. Mediciones de 24 horas cada seis días fueron realizadas utilizando muestreadores de alto volumen para PM<sub>10</sub> y PST y bajo volumen para PM<sub>2.5</sub>. Las concentraciones variaron entre 18,20 y 198,2 µg/m<sup>3</sup> para PST, 11,96 µg/m<sup>3</sup> y 100,05 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub> y 54,50 µg/m<sup>3</sup> y 3,37 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>2.5</sub>. Las máximas concentraciones se registraron en las estaciones ubicadas viento abajo de los tajos de explotación. Las relaciones de PM<sub>10</sub>/PST registraron valores entre 0,12 a 0,93 y las de PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> entre 0,33 y 0,51. También se observó correlación lineal significativa en PST/PM<sub>10</sub> (R= 0,81, 0,85, 0,77, 0,71, 0,69) y correlación lineal no significativa en PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> (R = 0,10 y 0,14). Las PST pueden ser una variable predictiva de PM<sub>10</sub> en la zona minera del Cerrejón mientras que las PM<sub>10</sub> no pueden ser utilizadas para predecir con confianza la concentración de PM<sub>2.5</sub> en la misma zona. Los resultados revelaron variabilidad significativa en las concentraciones de PST en relación a PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> dependiendo de la ubicación de las estaciones con respecto a los tajos de explotación.

*Palabras clave:* PST, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, muestreo, relación, concentración, tajo, Colombia

## CONCENTRATION AND RATIO PST, PM<sub>10</sub> AND PM<sub>2.5</sub> IN TOWNS NEAR OPEN PIT MINING: CASE CERREJÓN COLOMBIA

### ABSTRACT

PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and total suspended particles (TSP) samples were collected from January to June 2012 in the open pit mine Cerrejón north of Colombia. Measurements of 24 hours every six days were made using PM<sub>10</sub> and TSP High Volume air sampler and PM<sub>2.5</sub> Low Volume. Concentrations were 18.20 to 198.2 µg/m<sup>3</sup> for TSP, 11.96 µg/m<sup>3</sup> to 100.05 µg/m<sup>3</sup> for PM<sub>10</sub> and 54.50 µg/m<sup>3</sup> to 3.37 µg/m<sup>3</sup> for PM<sub>2.5</sub>. The maximum concentrations were recorded at stations located downwind of the pits. Relations PM<sub>10</sub>/TSP ranged 0.12 to 0.93 and the PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 0.33 to 0.51. Was also observed significant linear correlation in TSP/PM<sub>10</sub> (R= 0.81, 0.85, 0.77, 0.71, 0.69) and no significant linear correlation in PM<sub>2.5</sub>-PM<sub>10</sub> (R = 0.10 y 0.14). The TSP may be a predictor of PM<sub>10</sub> in the mining area Cerrejón, whereas PM<sub>10</sub> can not be used to predict the concentration of PM<sub>2.5</sub> in the same area. The results revealed significant variability in the concentrations of TSP in relation to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> depending on the location of the stations with respect to the pits of exploitation.

*Keywords:* TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, sampling, relation, concentration, pit, Colombia.

### INTRODUCCIÓN

Colombia es el primer productor de carbón de América Latina y el decimosegundo del mundo. Sus reservas totales se estiman en alrededor de 17 mil millones de toneladas, de las cuales se han medido 7 mil millones. La proyección nacional de oferta de carbón por distrito estimada para el año 2014, según la Unidad de Planeación Minero Energética

de Colombia (UPME), es de 124.9 millones de toneladas, de la cuales casi el 90% corresponde a extracción a cielo abierto (UPME, 2006). La minería de carbón a cielo abierto genera mayores impactos al medio ambiente que la minería subterránea. En particular, causa deterioro a la calidad del aire debido al material particulado y a los contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera (Ghose & Majee, 2007). Todas las operaciones que impliquen movimientos de tierra

o carbón o la exposición de las superficies erosionables, generan polvo fugitivo (USEPA, 1998). El material transportado ha sido identificado como la principal fuente de contaminación del aire, especialmente las partículas suspendidas totales (PST) y las partículas menores de 10 micras ( $PM_{10}$ ) (USEPA, 1988; Ghose & Majee, 2000). Las fuentes de contaminación del aire en áreas de extracción de carbón generalmente incluyen actividades como perforación, voladura, carga y descarga de material estéril, carga y descarga del carbón, apilamiento de carbón, vías de acarreo, vías de transporte, botaderos de escombros, planta de manejo de carbón, pilas de almacenaje de carbón y estéril y mantenimientos de vías (CMRI, 1999). Entre los distintos contaminantes del aire, el material particulado muestra fuerte evidencia de efectos adversos en la salud como la disminución de la función pulmonar, dificultad respiratoria e hipoxemia, cambios adversos en la función autonómica cardíaca (Dostal *et al.*, 2013; Muránszky *et al.*, 2011; Pope & Dockery, 2006). Otros estudios lo han asociado con excesos en la morbilidad y mortalidad (Hoek *et al.*, 2013; Brunekreef & Holgate, 2002). Una disminución de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración de las partículas finas se asoció con un aumento estimado en la media de esperanza de vida de 0,61 a 0,81 años (Pope *et al.*, 2009). Van-Steenis (2008) confirmó que el material particulado fino y ultra fino ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{1}$ ) causó un aumento en el asma al 33% de niños que viven a una milla de una mina de carbón a cielo abierto, con un aumento acumulado de 21% a dos millas e incluso hasta un 12% a menos tres millas. De igual manera, se ha registrado que cuando la producción de carbón se incrementa, la tasa de la enfermedad cardiopulmonar, la enfermedad pulmonar, la enfermedad cardiovascular, la diabetes y la enfermedad renal aumentan (Hendryx & Zullig, 2009). En Colombia, la Resolución 650 de 2010, por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, establece Sistemas Especiales de Vigilancia de Calidad de Aire (SEVCA) a cualquier población con problemáticas específicas de calidad del aire como minería y alto nivel de industrialización (MAVDT, 2010). Estas minas de explotación a cielo abierto deben tener su sistema de vigilancia de la calidad de aire especialmente para partículas PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . La mina del Cerrejón cuenta con una red de trece estaciones administrada por la autoridad ambiental de la región. Estas estaciones registran mediciones de partícula sedimentable, TSP,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Para este estudio se tomaron las estaciones con muestreadores de PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  ubicadas en centros urbanos. El comportamiento de las relaciones PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se usa para valorar la composición de las partículas por tamaño y su presencia en la atmósfera (Liu *et al.*, 2004) al igual que indicar la presencia en proporción de masa de un contaminante en el otro (Zhang *et al.*, 2013).

La linealidad de la relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  permite utilizar datos de  $PM_{10}$  para predecir con confianza la concentración de  $PM_{2.5}$  (Echeverri & Maya, 2008; Mugica *et al.*, 2002). El conocimiento de esta relación brinda información necesaria para tomar acciones y estrategias de control más adecuadas sobre las fuentes (Galvis & Rojas, 2006). Varios autores han mostrado resultados de la relación de estos contaminantes en zonas urbanas de ciudades con un grado significativo de industrialización y en ciudades intermedias sin industrialización (Galvis & Rojas, 2006; Rojano *et al.*, 2013). Sin embargo, no hay evidencia en Colombia de esta relación en centros urbanos aledaños a zonas de explotación de carbón en minería a cielo abierto. El objetivo de este trabajo es estudiar la calidad del aire en el área de estudio y determinar la relación entre PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en centros urbanos aledaños a zonas de explotación de carbón en minería a cielo abierto, específicamente, en la mina del Cerrejón al norte de Colombia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Cerrejón es una mina de explotación de carbón a cielo abierto localizada al norte de Colombia, en el departamento de La Guajira, frontera con Venezuela. Es una de las minas a cielo abierto más grandes del mundo. Está ubicada en las coordenadas  $11^{\circ}5'2''$  Norte y  $72^{\circ}40'31''$  Oeste (figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio

Los depósitos de carbón se encuentran en una extensión de 69.000 hectáreas, dentro de la cual hay cinco áreas de explotación denominadas tajo Patilla, tajo 100, tajo Oreganal, tajo Tabaco y tajo La Puente (Cerrejón, 2013). La topografía del terreno es representada por una llanura aluvial entre los sistemas montañosos de la Serranía del Perijá por el oriente y la Sierra Nevada de Santa Marta por el occidente. Se consideraron los receptores que forman parte de la Red de Calidad de Aire de la Corporación Ambiental de La Guajira (Corpoguajira). Estos receptores

corresponden a poblaciones y municipios seleccionados teniendo en cuenta la cercanía con las áreas de explotación minera.

#### Método de medición de PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Las mediciones de material particulado PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se realizaron entre el 2 de enero y el 26 de junio de 2012 en el área de influencia de la mina el Cerrejón. Las partículas PST y PM<sub>10</sub> se determinaron por el método gravimétrico, utilizando muestreadores de alto de volumen (Hi-Vol) con cabezal de separación inercial para las PM<sub>10</sub>, según lo establecido en el método de referencia para PST y PM<sub>10</sub> de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1980; EPA, 1997). La concentración de las partículas PM<sub>2.5</sub> se determinó utilizando un muestreador de bajo volumen (Partisol), regulado como método equivalente de la CFR (40 CFR Part 58). El equipo cuenta con separador de partículas finas de diámetro aerodinámico de 2.5 µm,

localizado en la entrada del aire. Los filtros se mantuvieron a ± 5 °C de la temperatura ambiente. Los equipos Hi-Vol y el Partisol operaron cada seis días con tiempo de muestreo de 24 horas, desde las 12:00 h hasta las 12:00 h del día siguiente. Se tomaron 30 muestras de material particulado PST, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> en cada estación. Se utilizaron filtros de fibra de vidrio para las PST, filtros de fibra de cuarzo para las PM<sub>10</sub> y filtro de fibra de teflón de 47 mm para los PM<sub>2.5</sub>. La tabla 1 presenta la ubicación de las estaciones, los equipos utilizados en el monitoreo y los parámetros medidos en cada estación.

Para la caracterización del comportamiento meteorológico de la zona de estudio, específicamente los parámetros que influyen en la dispersión atmosférica, se utilizaron los datos registrados en la estación del Centro de Desarrollo Ambiental (CDA), ubicada en el área del complejo carbonífero de Cerrejón en las coordenadas 10.09° Norte y 72.35° Oeste.

**Tabla 1.** Ubicación de las estaciones, equipos y parámetros medidos en cada estación

Estación	Ubicación	Equipo	Parámetros		
			PST	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Estación 1. Barrancas	11°31' N - 72°56' W	Hi-Vol (PST, PM <sub>10</sub> ), Partisol (PM <sub>2.5</sub> )	x	x	x
Estación 2. Provincial	11°52' N - 72°55' W	Hi-Vol (PST, PM <sub>10</sub> )	x	x	--
Estación 3. Patilla	11°32' N - 72°55' W	Hi-Vol (PST, PM <sub>10</sub> )	x	x	--
Estación 4. Cuestecita	11°17' N - 72°61' W	Hi-Vol (PST, PM <sub>10</sub> )	x	x	--
Estación 5. Las Casitas	11°32' N - 72°54' W	Hi-Vol (PST, PM <sub>10</sub> ), Partisol (PM <sub>2.5</sub> )	x	x	x
Estación Meteorológica	10°9' N - 72° 35 W				

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Concentración de PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

La tabla 2 presenta el promedio y la desviación estándar de las concentraciones de PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en los cinco puntos de muestreo. El rango de las concentraciones de PST en el muestreo varió entre 18,20 y 198,2 µg/m<sup>3</sup>.

El promedio geométrico diario más alto en las concentraciones de PST fue de 106,48 µg/m<sup>3</sup> registrado en la estación Las Casitas, ubicada viento abajo de los tajos Oreganal y 100. El promedio geométrico diario más bajo fue de 45,98 µg/m<sup>3</sup>, observado en la estación Cuestecita ubicada viento arriba de la zona de explotación minera.

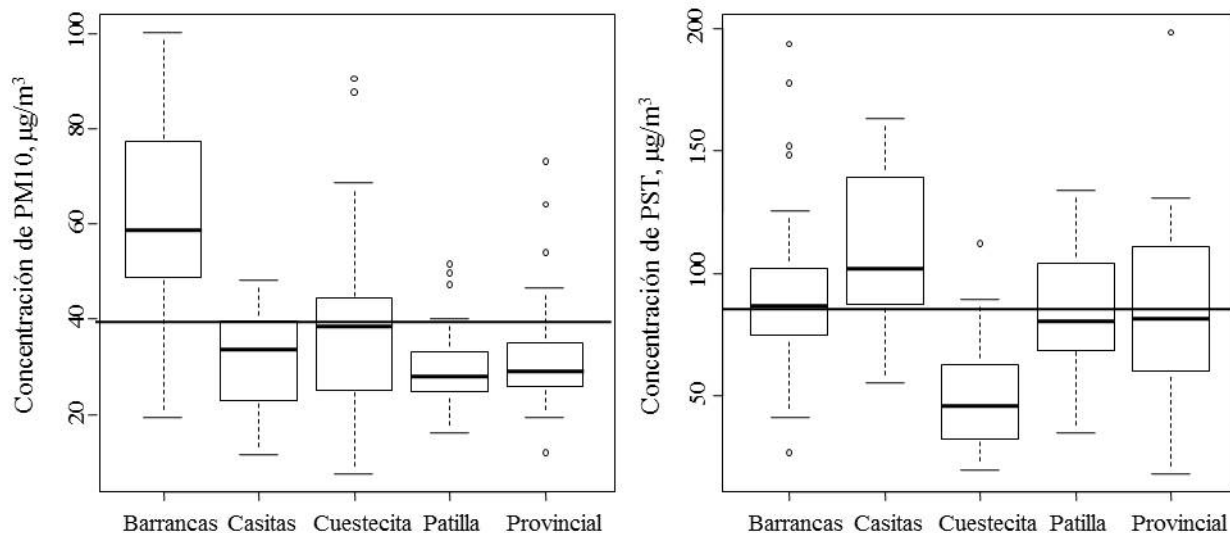
**Tabla 2.** Concentración promedio de partículas PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Estaciones	N	(PST)* (Desv.est) (µg/m <sup>3</sup> )	(PM <sub>10</sub> )(Desv.est) (µg/m <sup>3</sup> )	(PM <sub>2.5</sub> )(Desv.est) (µg/m <sup>3</sup> )
Estación 1. Barrancas	30	(88,63) (26,67)	(60,66) (11,46)	(17,52)(7,59)
Estación 2. Provincial	30	(77,26) (25,71)	(32,90) (12,99)	-
Estación 3. Patilla	30	(80,51) (25,28)	(30,20) (8,78)	-
Estación 4. Cuestecita	30	(45,98) (21,81)	(39,65) (18,67)	-
Estación 5. Las Casitas	30	(106,48)(23,36)	(43,50)(16,46)	(18,76)(10,58)

\*. Promedio geométrico. Desv. Est. = Desviación estándar.

Los resultados (figura 2) muestran una diferencia estadística entre los promedios de las estaciones. Las estaciones Barrancas, Patilla y Provincial presentan un comportamiento parecido; se observa mayor dispersión en la estación Provincial, siendo esta estación la que presenta el máximo y el mínimo nivel de PST entre todas las estaciones. El nivel de concentración de PST encontrado en las cinco estaciones no excedieron el nivel máximo permisibles

diario para PST del Estado colombiano, que es de  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (MAVDT, 2010). El rango de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  para el periodo de muestreo varió entre  $11,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $100,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La estación Barrancas reportó el mayor promedio en las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  con un nivel de  $60,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$  seguido de la estación Las Casitas con un promedio de  $45,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



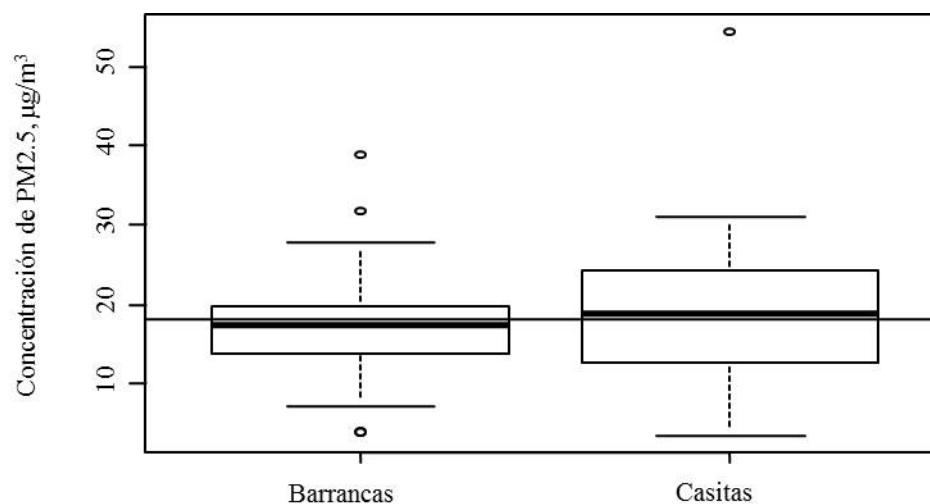
**Figura 2.** Concentración de  $\text{PM}_{10}$  y PST en cada estación

Los niveles más bajos se presentaron en las estaciones Cuestecita, Patilla y Provincial con promedios de  $30,20$ ,  $32,65$  y  $32,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Como fue mencionado, la estación Barrancas presentó las mayores concentraciones. Esta estación no está directamente viento abajo de los tajos Patilla y la Puente; sin embargo, está influenciada por las emisiones del transporte interno de la ciudad. Las estaciones Las Casitas, Cuestecitas, Patilla y Provincial presentaron comportamiento parecido en las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  con mayor dispersión en la estación Cuestecitas. Solo una muestra en la campaña excedió el nivel legal diario para partículas  $\text{PM}_{10}$  del Estado colombiano, que es de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y se presentó en la estación Barrancas.

Los promedios diarios de  $\text{PM}_{2,5}$  no excedieron los niveles establecidos en la Resolución 610 de 2010. La estación Las Casitas presentó el mayor promedio de concentración de  $\text{PM}_{2,5}$  con valor de  $18,76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con concentración máxima de  $54,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y mínima de  $3,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (figura 3). En esta estación una muestra superó el nivel legal diario en

un porcentaje del 9%. La estación Barrancas alcanzó un promedio de  $17,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con concentración máxima de  $38,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y mínima de  $3,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Los niveles de concentración de PST,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2,5}$  obtenidos en esta zona industrial fueron superiores a los reportados en zonas urbanas ubicadas a menos de 100 km viento arriba de la mina (Rojano *et al.*, 2013; Rojano *et al.*, 2012; Corpoguajira, 2008); sin embargo, fueron inferiores a los reportados en minas de carbón a cielo abierto cercanas al Cerrejón (Huertas *et al.*, 2012a; Angulo *et al.*, 2011) y a los reportados por minas a cielo abierto en otros lugares del mundo (Song *et al.*, 2014; Aneja *et al.*, 2012; Chaulya, 2004). Los resultados revelan exposición segura al material particulado proveniente de las operaciones de explotación de carbón de la comunidad que habita en esta zona, debido a que presenta niveles inferiores a los estándares nacionales y de la EPA. Un reciente proyecto de la EPA sugiere nuevo estándar de 24 horas para  $\text{PM}_{10}$  en el rango de  $65-85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (USEPA, 2010). Aun para los niveles proyectados se estarían cumpliendo estos preceptos.



**Figura 3.** Concentración de  $PM_{2,5}$  zona minera el Cerrejón

### Relación y distribución de masas

La tabla 3 presenta la relación de  $PM_{10}/PST$  y  $PM_{2,5}/PM_{10}$  en los puntos de muestreo. La relación  $PM_{10}/PST$  osciló entre los valores 0,12 a 0,93, presentando los mayores niveles

(0,93 y 0,90) en las estaciones Barrancas y Patilla. La relación de masa de  $PM_{2,5}/PM_{10}$  estuvo entre 0,06 a 0,78. El promedio de la relación de la masa del material particulado varió entre 0,41 y 0,71 para  $PM_{10}/PST$  y entre 0,33 y 0,51 para  $PM_{2,5}/PM_{10}$

**Tabla 3.** Promedios y correlación de la relación de  $PM_{10}/PST$  y  $PM_{2,5}/PM_{10}$

Estaciones	$PM_{10}/PST$ - ( $R^2$ )	$PM_{2,5}/PM_{10}$ - ( $R^2$ )
Estación 1. Barrancas	0,66 (0,66)	0,33 (0,01)
Estación 2. Provincial	0,41 (0,73)	-
Estación 3. Patilla	0,42 (0,59)	-
Estación 4. Cuestecita	0,71 (0,50)	-
Estación 5. Las Casitas	0,43 (0,47)	0,51 (0,02)

Las estaciones Barrancas y Cuestecita muestran que el 80% y el 67% de sus relaciones de masa  $PM_{10}/PST$  están entre 0,50 y 0,90, respectivamente; lo que indica un aporte de fuentes diferentes a la actividad minera. Este aporte pudiera deberse a emisiones comunes de centros urbanos tales como el suelo, el pavimento, la manipulación de materiales, los materiales de construcción y el tráfico vehicular (Pérez-Vidal *et al.*, 2010). Se observa una contribución significativa de las partículas inhalables en los diferentes sitios de muestreo; esta contribución, según los promedios, alcanza un porcentaje entre 41% y el 66% del total de PST. De igual manera, el material fino contribuye entre el 33% al 51% en las partículas respirables. Estos resultados preocupan debido a que este tamaño de material particulado ocasiona mayor riesgo sobre la salud. Estas relaciones de partículas  $PM_{10}/PST$  y  $PM_{2,5}/PM_{10}$  son similares a los reportados por Angulo *et al.* (2011) y Huertas *et al.* (2012b) en zonas de explotación minera similares a las del área de estudio; observándose menor nivel de concentración en La Mina el Cerrejón que

en esos lugares. Esto puede llevar a la conclusión de que la relación de masas de material particulado no dependa del nivel de concentración del contaminante, al contrario, puede deberse a las características de las fuentes que los emiten. La figura 4 presenta las concentraciones y correlaciones de PST y  $PM_{10}$ , en los cinco puntos de muestreo. El análisis de los resultados muestra correlación estadísticamente significativa entre  $PM_{10}$  y PST, en las estaciones Barrancas y Provincial (0,66 y 0,73,  $p < 0,05$ ) y correlación aceptable para las estaciones Patilla, Cuestecita y Las Casitas (0,59, 0,50 y 0,47,  $p < 0,05$ ). Estas relaciones de material particulado son menores comparadas con resultados de estudios en zonas urbanas de ciudades industrializadas en Colombia (Echaverry & Maya, 2008; Dongarrá *et al.*, 2010). Puede deberse a la mayor proporción de material fino ( $PM_{2,5}$ ) proveniente del transporte en estas ciudades. El de 40% de  $R^2$  en la relación  $PM_{10}/PST$  (tabla 3 y figura 4) fue mayor que 0,6. Por lo tanto, los niveles de partículas en la zona minera del Cerrejón tienen regular correlación.

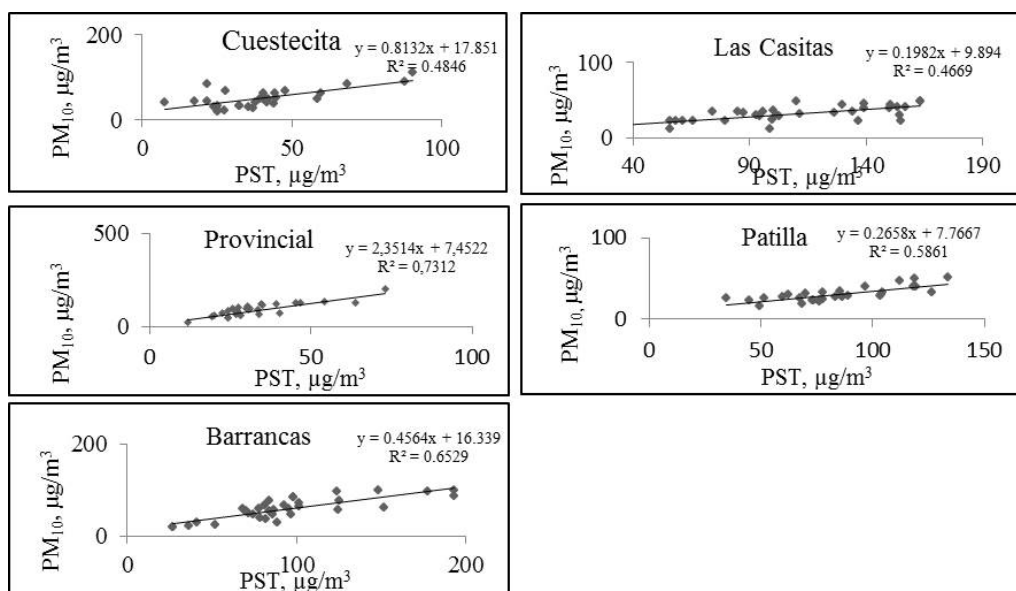


Figura 4. Correlación lineal en las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PST, en los puntos de muestreo

#### Dirección de viento y concentraciones

La tabla 4 presenta el resumen de los datos meteorológicos en el periodo de muestreo. La velocidad del viento registró

promedio de 3,31 m/s, alcanzando valores máximos cercanos a los 8,20 m/s y periodos de calma (velocidad del viento de 0 m/s) solo un 3,18%. La dirección predominante fue noreste (NE) con una frecuencia del 86%.

Tabla 4. Promedios de los parámetros meteorológicos en el periodo enero -junio de 2012

Parámetro	Media (Desv. Est)	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	27,0(4,72)	34,0	17,6
Viento (m/s)	3,31(0,70)	8,20	0,00
Humedad relativa (%)	80,2(7,24)	85,0	64,0
Presión barométrica (mmHg)	758 (10)	760	755
Precipitación (mm de H <sub>2</sub> O)	67,9 (49,9)	152	4,50
Evaporación (mm)	5,54(1,44)	9,62	1,31

Desv. Est. = Desviación estándar

La figura 5 presenta el análisis de la dirección del viento y las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PST. Se observa que las estaciones de Barrancas, Provincial y Patilla están directamente influenciadas por el tajo Patilla (el tajo de mayor dimensión y actividad en la mina) y el botadero Patilla (zona de almacenaje de material estéril). La estación Provincial es la más cercana al tajo Patilla (< 5 km) y está ubicada directamente en la dirección predominante del viento, coincidiendo con los mayores registros y promedios de estas tres estaciones. La estación Las Casitas está influenciada por los tajos Oreganal, 100, Comunero, Patilla y Caypa. Esta estación está a menos de 3 km de los tajos Comunero y 100 y está directamente en el vector de dirección resultante del viento de 241° (SOO). Esta estación es la que presenta las mayores concentraciones en este estudio. Entre esta estación y los tajos mencionados no hay fuentes significativas de emisión de PM<sub>10</sub> y PST,

por lo que se concluye que el aporte potencial de material particulado en esta estación es producido por las actividades de extracción de los tajos Comunero y 100. La estación Cuestecita, ubicada viento arriba de los tajos, mostró los menores niveles de concentraciones de PST, no así con los niveles de PM<sub>10</sub>. Esto indica que no hay aporte significativo de operaciones mineras pero sí aporte de actividades cotidianas y de transporte, por ser una zona urbana de flujo de tráfico liviano y pesado. Este análisis no describe un fenómeno físico de causa y efecto; por lo tanto, no se puede utilizar para identificar las fuentes de contaminación influyentes en las estaciones Barrancas, Provincial, Patilla y Las Casitas; sin embargo, las principales fuentes de emisión son las de área, que están asociadas con las actividades de extracción de carbón; luego, se puede inferir una influencia de los tajos en el aporte de PM<sub>10</sub> y PST.

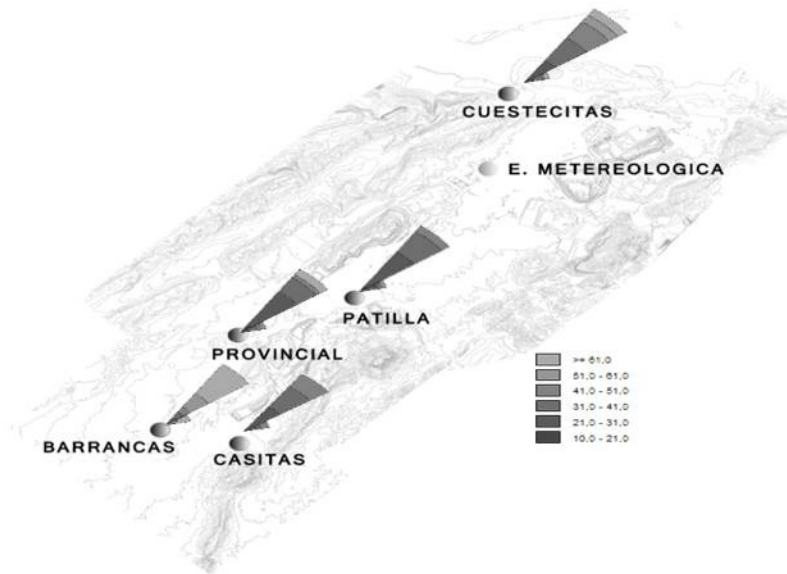


Figura 5. Rosa de Contaminación de PM10 y PST por estación, Cerrejón La Mina

## CONCLUSIONES

En los cinco sitios de muestreo los resultados de las concentraciones de PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  no excedieron los estándares diarios de la Norma Colombiana y la National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) de los Estados Unidos. El comportamiento lineal de las relaciones  $PM_{10}/PST$  y  $PM_{2.5}/PM_{10}$  en las estaciones estudiadas en la mina el Cerrejón permite utilizar los valores de PST para predecir la concentración de  $PM_{10}$ . Los datos de  $PM_{10}$  de áreas de extracción mineras no pueden ser utilizados para predecir con confianza la concentración de  $PM_{2.5}$ . Según la dirección predominante del viento, el aporte de  $PM_{10}$  y PST en los sitios de monitoreo está influenciado en forma significativa por las actividades mineras. La contribución significativa de polvo suspendido proviene de las fuentes de operación mineras.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Corporación Autónoma Regional de La Guajira por el suministro de datos de la zona de estudio; a la Universidad de La Guajira y al programa “Estrategia de Sostenibilidad 2013-2014 de la Universidad de Antioquia (Colombia)” por el financiamiento y apoyo para el desarrollo de este proyecto; a Carbones del Cerrejón Limited y Colciencias por la financiación del proyecto “Aplicación de los modelos de receptor en el aporte de fuentes a la contaminación del aire por material particulado” Código 1115524304651.

## REFERENCIAS

- ANEJA, V., ISHERWOOD, A., MORGAN, P. (2012). Characterization of particulate matter ( $PM_{10}$ ) related to surface coal mining operations in Appalachia. *Atmos Environ.* 54; pp. 496-501.
- ANGULO L., HUERTAS J., RESTREPO G. (2011). Caracterización de partículas suspendidas (PST) y partículas respirables ( $PM_{10}$ ) producidas en áreas de explotación carbonífera a cielo abierto. *Información Tecnológica.* 22(4); pp. 23-34.
- BRUNEKREEF, B. & HOLGATE, S. (2002). Air pollution and health. *The Lancet.* 360; pp. 1233-1242.
- CARBONES DEL CERREJÓN LIMITED. Cerrejón. Departamento Gestión Ambiental. (2013). Modelación de Calidad del Aire. Plan Minero. Albania. 35 p.
- CENTRAL MINING RESEARCH INSTITUTE. (CMRI). (1999). Annual environmental monitoring report for Lakhanpur area. GC/EMG/94/98-99. Report. Dhanbad. 280 p.
- CHAULYA, S. (2004). Assessment and management of air quality for an opencast coal mining area. *J Environ Manage.* 70; pp. 1-14.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE LA GUAJIRA (CORPOGUAJIRA). (2008). Oficina de Monitoreo y Control. Estudio de emisiones atmosféricas para el municipio Riohacha en los contaminantes partículas suspendidas totales (PST) y menores de 10

- micras PM<sub>10</sub>. Informe. Riohacha, 120 p.
- DONGARRÁ, G.; MANNO, E., VARRICA, D., LOMBARDO, M. (2010). Study on ambient concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>10-2.5</sub>, PM<sub>2.5</sub> and gaseous pollutants. Trace elements and chemical speciation of atmospheric particulates. *Atmos Environ.* 44; pp. 5244-5257.
- DOSTAL, M., PASTORKOVA, A., RYCHLIK, S., RYCHLIKOVA, E., SVECOVA, V., SCHALLEROVA, E., SRAM, R. (2013). Comparison of child morbidity in regions of Ostrava, Czech Republic, with different degrees of pollution: a retrospective cohort study. *Environmental Health.* 12; pp. 2-11.
- ECHEVERRI, C., MAYA, G. (2008). Relación entre las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) y respirables (PM<sub>10</sub>) en la ciudad de Medellín. *Revista Ingenierías (Universidad de Medellín)* 7; pp. 23-42.
- GALVIS B., ROJAS N. (2006). Relación entre PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la ciudad de Bogotá. *ACTA NOVA.* 3(2); pp. 336-353.
- GHOSE, M., MAJEE, J. (2000). Assessment of dust generation due to opencast coal mining-an Indian case study. *Environ Monit Assess.* 61; pp. 257-263.
- GHOSE, M., MAJEE, J. (2007). Characteristics of hazardous airborne dust around an Indian surface coal mining area. *Environ Monit Assess.* 130; pp. 17-25.
- HENDRYX, M., ZULLIG, K. (2009). Higher coronary heart disease and heart attack morbidity in Appalachian coal mining regions. *Prev Med.* 49; pp 355-359.
- HOEK, G., KRISHNAN, R., BEELEN, R., PETERS, A., OSTRO, B., BRUNEKREEF, B., KAUFMAN, J. (2013). Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. *Environmental Health.* 12; pp. 2-15.
- HUERTAS, J., CAMACHO, D., HUERTAS, M. (2012a). Standardized emissions inventory methodology for open pit mining areas. *Environ Sci Pollut R.* 19; pp. 784-2794.
- HUERTAS, J., HUERTAS, M., SOLÍS, D. (2012b). Characterization of airborne particles in an open pit mining region. *Sci Total Environ.* 423; pp. 39-46.
- LIU, Y., CHEN, R., SHEN, X., MAO, X. (2004). Wintertime indoor air levels of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM1 at public places and their contributions to TSP. *Environment International.* 30(2); pp. 189-197.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. MAVDT. (2010). Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. *Diario Oficial* 47.672. Resolución 0610 de 2010. Colombia. 17 p.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética. UPME (2006). Plan Nacional para el desarrollo minero. Visión año 2019. Plan Nacional. Bogotá. 125 p.
- MUGICA, V., MAUBERT, M., TORRES, M., MUÑOZ, J., RICO, E. (2002). Temporal and spatial variations of metal content in TSP and PM<sub>10</sub> in Mexico City during 1996-1998. *J Aerosol Sci.* 33; pp. 91-102.
- MURÁNSZKY, G., ÓVÁRI, M., VIRÁG, I., CSIBA, P., DOBAL, R., GYULA, Z. (2011). Chemical characterization of PM<sub>10</sub> fractions of urban aerosol. *Microchem J.* 98; pp. 1-10.
- PÉREZ-VIDAL, H., LUNAGÓMEZ-ROCHA, M., ACOSTA-PÉREZ L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM<sub>10</sub>), en Cunduacán, Tabasco, *Universidad y Ciencia*, 26(2): 151-162.
- POPE, C., DOCKERY, D. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manage.* 56; pp. 1368-1380.
- POPE, C., EZZATI, M., DOCKERY, D. (2009). Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New Engl J Med.* 360; pp. 376-386.
- ROJANO R., PÉREZ J., FREYLE E. (2012). Effect of relative humidity in determining PM<sub>10</sub> using a DataRam 4 in coastal region of Colombia. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia.* 35 (2); pp. 1- 9.
- ROJANO, R., ANGULO, L., RESTREPO, G. (2013). Niveles de partículas suspendidas totales (PST), PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> y su relación en lugares públicos de la ciudad Riohacha, Caribe Colombiano. *Información Tecnológica.* 24; pp. 37-46.
- SONG, X., SHAO, L., ZHENG, Q., YANG S., (2014). Mineralogical and geochemical composition of particulate matter (PM<sub>10</sub>) in coal and non-coal industrial cities of Henan Province, North China. *Atmos Res.* 143; pp. 462-472.



- UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. USEPA. (2010). Policy Assessment for the Review of the Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards, Second External Review Draft. Recuperado el 29 de noviembre de 2013, de <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/data/20100630seconddraftmpa.pdf>
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA. (1980). Reference method for the determination of suspended particulate matter in the atmosphere (high-volume method). Appendix B to part 50. Quality Assurance Division. Research Triangle Park, NC 27711, pp. 33-45.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA. (1997). Reference method for the determination of particulate matter as PM<sub>10</sub> in the atmosphere. Appendix J to part 50. Quality Assurance Division. Research Triangle Park, NC 27711, pp. 73-78.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. USEPA. (1988). Control of open fugitive dust sources. Office of Air Quality Planning and Standards, EPA-450/3-88-008. Report. North Carolina. 349 p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. USEPA. (1998). Emission Factors for AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Section 11.9, Western Surface Coal Mining Fifth Edition, Project N°4604-02. Research Triangle Park, North Carolina, 350p.
- VAN-STEENIS, D. (2008). Coal open casting and health. Recuperado el 12 de enero de 2014, de <http://www.countrydoctor.co.uk/precis/precis%20-%20Opencasting%20coal%20and%20health.htm>
- ZHANG, N., CAO, J., XU, H., ZHU C. (2013). Elemental compositions of PM<sub>2.5</sub> and TSP in Lijiang, southeastern edge of Tibetan Plateau during pre-monsoon period. *Particuology*. 11; pp. 63-69.