

## Composición Elemental y Fuentes de Origen de Partículas Respirables (PM<sub>10</sub>) y Partículas Suspendidas Totales (PST) en el Área Urbana de la Ciudad de Riohacha, Colombia

Roberto Rojano<sup>(1, 2)</sup>, Heli Arregoces<sup>(1, 2)</sup>, Gloria Restrepo<sup>(2)</sup>

(1) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Km 5 Vía a Maicao, Riohacha-Colombia. (e-mail: rrojano@uniguajira.edu.co)

(2) Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21, Medellín-Colombia. (e-mail: gloma@udea.edu.co)

Recibido Feb. 21, 2014; Aceptado May. 12, 2014; Versión final recibida Jun. 25, 2014

### Resumen

En esta investigación se evaluó la concentración, composición elemental y fuentes de origen de partículas PM<sub>10</sub> y PST. Quince elementos químicos (As, Cd, Ca, Zn, Cu, Cr, Co, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Na y V) se determinaron utilizando espectrometría de absorción atómica. Los niveles de PM<sub>10</sub> (19.4 y 51 µg/m<sup>3</sup>) y PST (27.6 y 53.7 µg/m<sup>3</sup>) no excedieron estándares internacionales. El Factor de Enriquecimiento (FE) mostró que los elementos de trazadores de suelo están asociados con las partículas PST, mientras que los elementos de origen antropogénicos están asociados con las partículas PM<sub>10</sub>. El Zn, Cu y Co, mostraron fuerte enriquecimiento en PM<sub>10</sub> y PST en las dos estaciones, concluyéndose que son elementos de origen antropogénicos. Para el grupo de trazadores de suelo: Na, As, Pb y Ni, presentaron enriquecimiento moderado. Los resultados mostraron que el Mg, Mn, V y K se originan en el proceso natural del suelo.

*Palabras clave:* PM<sub>10</sub>, PST, fuentes de contaminación, traza de elemento, factor de enriquecimiento

## Elemental Composition and Sources of Inhalable Particles (PM<sub>10</sub>) and Suspended Total Particles (TSP) in the Urban Area of the City of Riohacha, Colombia

### Abstract

This research evaluated the concentration, elemental composition and sources of origin of particle PM<sub>10</sub> and TSP. Fifteen chemical elements (As, Cd, Ca, Zn, Cu, Cr, Co, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Na and V) were determined using atomic absorption spectrometry. Levels of PM<sub>10</sub> (19.4 and 51 µg/m<sup>3</sup>) and TSP (27.6 and 53.7 µg/m<sup>3</sup>) did not exceed international standards. The enrichment factor (EF) showed that the soil tracer elements are associated with TSP particles while elements of anthropogenic origin are associated with PM<sub>10</sub> particles. Zn, Cu and Co, showed strong enrichment in PM<sub>10</sub> and TSP in the two stations, concluding that are elements of anthropogenic origin. For the group of soil trace elements: Na, As, Pb and Ni, showed a moderate enrichment. The results showed that elements such as Mg, Mn, V and K originated from the natural process of soil.

*Keywords:* PM<sub>10</sub>, TSP, contaminating sources, trace element, enrichment factor

## INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en muchas ciudades en vías de desarrollo o intermedia pueden verse afectadas por contaminantes atmosféricos específicamente el material particulado (MP) y los contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos, esto debido al uso del suelo, época del año y la actividad antropogénica (Vázquez *et al.*, 2012). En la actualidad los entornos urbanos pueden representar mayor exposición que sitios polvorientos (Hinwood *et al.*, 2014). El material particulado se ha destacado por el efecto nocivo a la salud, en particular la atención se ha centrado en las partículas finas (Pope y Dockery, 2006; Gualtieri *et al.*, 2010, Romanazzia *et al.*, 2014), sumado a esto, los contaminantes no convencionales también pueden inducir efectos relacionados con la salud. Por ejemplo, algunos elementos traza presentes en PM10 y PST estas clasificados como cancerígenos para los humanos tales como el V, Pb y Cd (MAVDT, 2010). Investigaciones realizadas han mostrado sus efectos cancerígenos y alérgicos cuando se estudian en partículas PM10 (Muránszky *et al.*, 2011; Ravindra *et al.*, 2004).

La evaluación de la composición química de las partículas determina no sólo su potencial toxicológico y el comportamiento en la atmosfera (Pacyna, 1998), sino que también se convierte en una herramienta muy valiosa para evaluar la contribución de las diferentes fuentes, especialmente en el desarrollo de estrategias para controlar y reducir la contaminación del aire (Bessagnet *et al.*, 2004; Angulo, *et al.*, 2011). En Riohacha, La Guajira colombiana, se han realizados estudios de partículas PST y PM10, concluyendo que los niveles de contaminantes particulado no violan los límites establecidos por lo normativa colombiana, sin embargo, el material particulado PM10, presenta niveles ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) que pueden alcanzar los estándares anuales. Los resultados encontrados mostraron que la concentración de partículas en el área urbana de la ciudad de Riohacha, están influenciado en gran porcentaje por tráfico vehicular y en menor proporción por las emisiones de las vías destapadas, el pavimento, los materiales de construcción entre otros (Rojano *et al.*, 2013).

La Guajira Colombiana es frontera con el estado Zulia de Venezuela, en consecuencia, hay un fluido comercial importante, este dinamismo incluye el comercio legal e ilegal de la Gasolina y el ACPM; elementos que en la actualidad hacen parte fundamental de la dinámica socioeconómica y ambiental de la ciudad de Riohacha; debido a su bajo costo, ocasionado aumento exagerado del parque automotor, causando deterioro de la calidad del aire (Castro *et al.*, 2013). Todo el combustible que se consume en la Guajira Colombiana proviene del estado Zulia de Venezuela; en otras palabras, se consume el mismo combustible que se consume en la ciudad de Maracaibo, Venezuela, por consiguiente se podrían esperar los mismos problemas encontrados en la atmosfera de esa ciudad pero en menor escala. Las normas venezolana COVENIN 3457:1999 (COVENIN, 1999) contempla las características mínimas de calidad que deben cumplir la gasolina sin plomo utilizadas en motores de combustión internas, entre las cuales podemos reseñar: contenido de azufre 0,06% en volumen, plomo 0,013 g/L, lo cual demuestra que todavía hay presencia de plomo en la gasolina. Estudios realizados en el área urbana de Maracaibo han concluidos violación al estándar primario anual de Estados Unidos de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el estándar anual europeo de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , presentándose problemas de contaminantes secundarios (Cano *et al.*, 2013a).

En cuanto a especies químicas presente en el material particulado, las concentraciones de Pb reportadas es estos estudios no exceden los estándares establecidos por la USEPA, pero existen niveles cercanos al límite según los autores. Otra conclusión importante de ese estudio es el caso del Ni, elemento con riesgo potencial a la salud, que sus niveles han violado el estándar establecido por la Organización Mundial de la Salud, WHO (Machado *et al.*, 2010). Todos estos antecedentes despiertan interés debido a que cerca del 75 a 90% de metales como Cd, Pb, Zn, V y Ni se encuentran en la fracción del material particulado inhalable PM10 (Chandra *et al.*, 2006; Balakrishnaiah *et al.*, 2012). En este trabajo se realizó un análisis de la concentración y la composición química de las partículas PM10 y PST con el fin de identificar las fuentes que actúan en la atmosfera urbana de la ciudad de Riohacha, Caribe Colombiano. Los elementos químicos tenidos en cuenta en este estudio fueron: As, Cd, Ca, Zn, Cu, Cr, Co, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Na y V.

## METODOLOGÍA

### *Descripción del Área de estudio*

La investigación se realizó en la zona urbana de la ciudad de Riohacha, ubicada al Sureste del Departamento La Guajira en el Norte de Colombia. La ciudad de Riohacha se encuentra situada geográficamente entre las coordenadas  $11^{\circ} 30' 44,37''$  Norte,  $72^{\circ} 55' 26,09''$  Oeste y  $11^{\circ} 33' 15,65''$  Norte,  $72^{\circ} 53' 29,77''$  Oeste (Ver figura 1). Está rodeada por el mar desde el Sur-oeste al noreste en la dirección de las agujas del reloj y por las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, en los lados restantes. Tiene una población de más de 178.162 habitantes en su área urbana. El clima es seco con una temperatura promedio de  $28^{\circ}\text{C}$ , modificada un poco con la brisa marina y los vientos alisios del noreste que soplan

durante la mayor parte del año; las lluvias son escasas y se presentan generalmente en los meses de septiembre a noviembre (Cabeza, 2009). Riohacha es la ciudad con más densidad de tráfico en el Departamento de La Guajira y entre las de menor tráfico en Colombia.

#### Selección de los sitios de muestreo

Para este estudio, un objetivo determinante era la obtención de una muestra representativa de la zona urbana limitado por el número de equipo a utilizar. Por lo anterior, el número de estaciones de muestreo se estableció teniendo en cuenta la población de la ciudad y el tipo de contaminante a monitorear (Garcías de Rosell, 1999). García de Rosell sugiere que para evaluar la calidad del aire en zonas urbanas de poblaciones menores a un millón de habitantes y monitorear partículas suspendidas se requieren alrededor de dos puntos de monitoreo. Cierta criterio es razonable cuando el objetivo de la investigación se centra específicamente a la determinación de los niveles de concentración y elementos químicos en el aire atmosférico. Las principales fuentes de contaminación en la ciudad de Riohacha son el transporte en gran porcentaje, las emisiones de fuentes misceláneas principalmente vías no pavimentadas y un número relativamente pequeño de restaurantes que operan en la zona urbana (Rojano *et al.*, 2011). Para cumplir los objetivos de la investigación, se establecieron 2 puntos de muestreo.

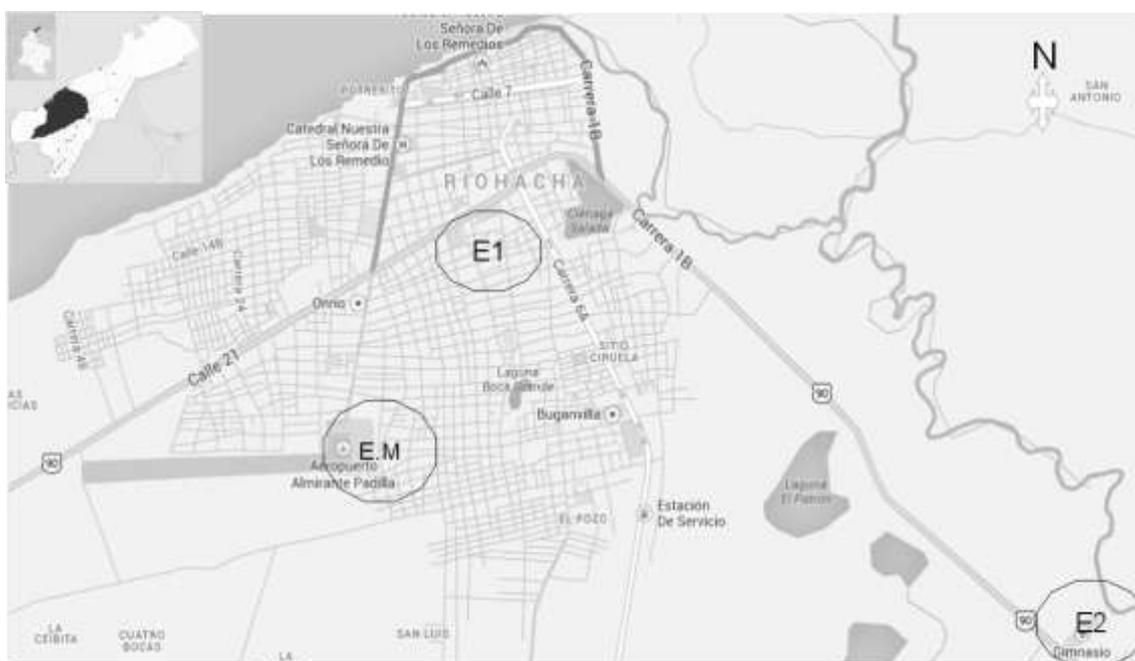


Fig.1: Localización de los sitios de muestreo en el área de estudio (EM Estación Meteorológica IDEAM)

La localización de los puntos se hizo teniendo en cuenta el flujo vehicular, la dirección del viento, el uso de la tierra y el alcance de la investigación. Según el tamaño de la ciudad, fue fácil identificar las intercepciones de mayor y menor tráfico vehicular. El punto 1, representan la zona de alto tráfico vehicular (Estación 1: Cruz Roja Guajira), su localización es la Cruz Roja Colombiana Seccional Guajira (Cl 15 No. 8-69). La estación 2 se ubicó viento arriba de la ciudad; estación de fondo (blanco) en predio de la universidad de La Guajira, su localización es la Universidad de La Guajira (Km 5 vía a Maicao). La Tabla 1, presenta en forma resumida, las características de los sitios de muestreos y la Tabla 2, las técnicas utilizadas y los parámetros medidos en cada estación.

Tabla 1: Características y ubicación de los sitios de muestreos.

Sitio de muestreo	Localización	Tipo de Terreno	Observaciones
Estación 1. Cruz Roja Guajira	11°31'20.1"N - 72°56'51.7"W	Plano	Alto tráfico vehicular/viento abajo de la intercepción.
Estación 2. Uniguajira	11°30'44.2"N - 72°52'16.8"W	Plano	Bajo tráfico vehicular/Blanco viento arriba de la ciudad
E.M: Estación meteorológica	11°53'00"N - 72°93'00"W	Plano	Aeropuerto Almirante Padilla

Tabla 2: Tecnología y Parámetros medidos en cada estación.

Estación	Nombre	Tecnología	Parámetros	
			PST	PM10
E1	Cruz Roja Guajira	Hi-Vol (PST, PM10)	X	X
E2	Uniguajira	Hi-Vol (PST, PM10)	X	X

### Meteorología

Los datos meteorológicos (Tabla 3), fueron suministrados por la estación meteorológica Almirante Padilla del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ubicada en el aeropuerto de la Ciudad de Riohacha (punto EM de la Figura 1).

Tabla 3: Descripción de los parámetros meteorológicos en el periodo de muestreo noviembre, marzo 2011

Parámetro	Media (Desv. Est)	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	22,3 (0,50)	33,0	24,8
Viento (m/s)	9,0 (2,52)	9,80	2,65
Humedad Relativa (%)	80,8 (5,72)	86	66
Presión barométrica (mmHg)	758 (10,5)	760	756
Precipitación (mm de H2O)	91.5 (73.9)	158,7	12,5

La dirección predominante del viento fue este-noreste (ENE 67.5°) en un 90 %. La dirección del viento presentó una tendencia preferencial ENE, coincidiendo con la dirección planificada para la ubicación de los equipos, evidenciando la correcta selección de los puntos de muestreos. La velocidad del viento presentó una promedio 9.40 m/s con velocidad máxima de 12.3 m/s en el mes de enero y una mínima de 2.65 m/s en el mes de febrero. En los registros se presentó sólo un 5.75% de periodos de calma (velocidad del viento de 0 m/s). Durante el desarrollo de la campaña de muestreo se registraron 14 días de lluvias, alcanzando precipitaciones con media mensual de 91.5 mm con una máxima de 158,7 mm en el mes de noviembre y una mínima de 12.5 mm alcanzándose en un solo día de muestreo.

### Medición de PST y PM10.

La concentración de partículas suspendidas totales (PST), se determinó por el método gravimétrico, establecido en el Método de referencia de la CFR (Code of Federal Regulations) para determinar material particulado suspendido de la EPA (Appendix B to Part 50—Reference Method for the Determination of Suspended Particulate Matter in the Atmosphere: High-Volume Method), Se empleó un muestreador de alto volumen. La concentración de PM10 se determinó por el método gravimétrico, según lo establecido en el Método de referencia de la CFR para determinar materia particulado en la atmosfera menor de 10 micras (Code of Federal Regulations. Appendix J to Part 50, 1997). Se empleó un muestreador de alto volumen con cabezal PM10. Los equipos Hi-Vol, operaron 24 horas desde las 7:00 am hasta las 7:00 am del día siguiente de forma simultánea. Se utilizó filtros de fibra de vidrio para las PST y filtros de fibra de cuarzo para las PM10. Los muestreos se desarrollaron con un flujo constante e de 1,13 m<sup>3</sup>/min para las PM10 y de 1.24 m<sup>3</sup>/min para los PST. Los filtros se colocaron antes y después del muestreo en un desecador marca VACUMFEST-DURAN que utiliza como elemento desecante el sílice gel por un periodo de 24 horas. Los filtros se pesaron antes y después del muestreo en una balanza analítica con cámara de pesaje de referencia AR2140, con precisión de medida de 0.10 µg. En cada punto se tomaron 30 muestras en el periodo comprendido desde el 4 de noviembre de 2011 hasta el 2 de febrero de 2012. Para determinar la altura del punto de muestreo, las distancias a las vías e infraestructura se siguió el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire de Colombia (MADS, 2010), este protocolo incorpora los lineamientos a tener en cuenta para llevar a cabo la operación de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en el país.

### Análisis químico de filtros

La concentración de especies químicas en el material particulado PST y PM10 se determinó utilizando espectrofotómetro de absorción atómica de llama (FAAS) para los elementos As, Cd, Ca, Zn, Cu, Cr, Co, Fe, Mg, Mn, N, Pb, K y Na y espectrometría de absorción Atómica en horno de grafito (GFAAS) para el V.

Los límites de detección estuvieron en el rango de 0.20 a 0.002  $\mu\text{g}/\text{ml}$  para los diferentes elementos, con excepción de V, que tenían un límite de detección de aproximadamente 1,40  $\mu\text{g}/\text{ml}$ . El error fue menor de 10% para los 15 elementos. Después de obtenido el peso del filtro, este se corta en una tira de una novena parte luego es digerido en 30 ml de ácido nítrico puro al 65% a una temperatura de 150-200  $^{\circ}\text{C}$  durante 2 h, luego se diluyó con 50 ml de agua destilada-desionizada. Después de la digestión, el espectrofotómetro de absorción atómica de llama y horno se utilizó para medir las concentraciones de metales en las partículas. Todas las concentraciones elementales fueron corregidas en los filtros en blanco y luego se convirtieron en las condiciones estándar de acuerdo con la presión y temperatura del aire local. Los equipos fueron calibrados según los términos del fabricante.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Relación y Niveles de PST y PM10

El promedio aritmético de material particulado PM10 para las 30 muestras diarias recolectadas en forma continua durante 24 horas, en un intervalo de 3 meses fue 51.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación 1 y 19.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para la estación 2. Se presentó un nivel máximo de 81.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo de 3.75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la campaña de monitoreo. De igual manera para material particulado PST, se obtuvo un promedio geométrico diario de 53.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación 1 y 27.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación 2. Se presentó un nivel máximo de 115.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo de 12.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la campaña de monitoreo. Se observa en estos resultados, la influencia del tráfico vehicular en las estaciones E1 sumado la influencia de material re-suspendido emitidos por las vías destapadas ubicadas viento arriba de la estación. La figura 2 muestra la distribución de los datos de PST y PM10. Se puede observar que los niveles de PST y PM10 en la estación 1 son mayores que en la estación 2. Esto debía esperarse por estar ubicada esta zona en un mayor tráfico vehicular. Las relaciones PM10/PST en las dos estaciones variaron desde 0.56 a 0.99 con promedio de 0.93 y 0.67 en las estaciones 1 y 2 respectivamente.

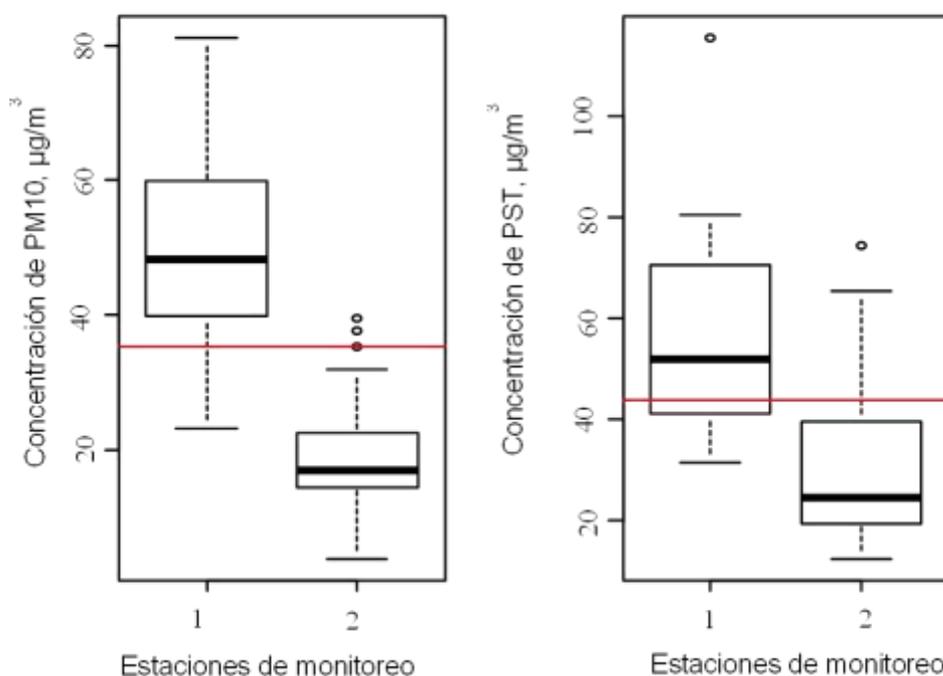


Fig. 2: Concentración de material particulado PM10 y PST en las estaciones 1 y 2.

La estación 2, ubicada viento arriba de la ciudad de Riohacha y establecida como fondo en el monitoreo, indica que en esta parte de la ciudad el 67% de las partículas son menores de 10  $\mu\text{m}$ , pudiera deberse según lo cita Pérez-Vidal et al. (2010), por fuentes de emisión de suelo, el pavimento y los materiales de construcción que están relacionado con actividades que se realizan cercana al sitio de muestreo. Las partículas inhalables PM10, alcanzan cerca al 93% en las partículas suspendidas totales en la zona de influencia vehicular (ver tabla 4). Esto significa que estos metales están presentes preferiblemente en la fracción inhalable y podrían ser un riesgo para la salud. Los niveles y la relación de PST y PM10 reportados en esta investigación son concuerdan con los reportados en la misma zona (Amaya, 2008; Rojano et al., 2011; Rojano et al., 2012) y otras ciudades intermedia similares y cercanas a Riohacha (Candanoza et al., 2013; Álvarez et al., 2013).

Se pudo observar la influencia de los parámetros meteorológicos velocidad del viento y precipitación en los niveles de concentración de PM10 y PST. En el monitoreo se registraron niveles de velocidad de viento (2.65 m/s) por debajo del comportamiento medio; igualmente se registró niveles de precipitación menores que los promedios normales. Este comportamiento tiende a aumentar el nivel de contaminantes en el aire. A pesar de esto, ninguno de los contaminantes particulado, establecidos como contaminantes de referencia en Colombia, violó los niveles diarios establecidos en la Resolución 610 de 2010.

Tabla 4: Concentración y relación de PM10 y PST en los dos puntos de monitoreo

Estaciones	PST (Desv.Est) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM10 (Desv.Est) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM10/PST
Estación 1. Cruz Roja Guajira	53.7 (19.2)	51.0 (14.5)	0.930
Estación 2. Uniguajira	27.6 (16.2)	19.5 (8.62)	0.670

#### Composición química de las partículas PST y PM10

Las muestras digeridas y filtradas fueron analizadas para 15 elementos de interés. El promedio de las concentraciones de los elementos químicos (As, Cd, Ca, Zn, Cu, Cr, Co, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Na y V) presentes en las partículas PM10 y TSP se muestran en la Tabla 5. Dividiendo los elementos en dos grandes grupos: elementos de corteza terrestre o trazadores de suelo (Na, K, Mg, Ca, Fe y Mn) y elementos parcialmente antropogénicos (V, Cr, Cd, Ni, Cu, Pb, Zn y As) dependiendo de la fuente de origen y la ruta de viaje de la masa de aire (Wang *et al.*, 2006), se puede observar una disminución en las concentraciones de PM10 de los elementos As, Zn, Cr y Pb en la estación 2 en comparación con la estación 1. Analizando esta disminución, considerando que la estación 2 es blanco ubicada en zona rural viento arriba de la ciudad, se puede inferir un impacto del flujo vehicular en la concentración de partículas PM10. Comparando estos resultados con el estudio realizado en la ciudad de Maracaibo en los años 1996 y 2009 para los elementos Pb y Ni en partículas PM10 (Cano *et al.*, 2013b), se puede observar que el nivel Pb obtenido en este estudio registra menor nivel; pero significativo si se tiene en cuenta que Riohacha es una ciudad intermedia mucho menor que Maracaibo. En relación al Ni, este estudio registro niveles mayores, lo que supone fuentes diferentes al transporte afectando la concentración de PM10 en esta ciudad. Es importante señalar que Maracaibo es la capital del estado Zulia, lugar de donde se transporta el 100 % del combustible consumido en Riohacha.

Tabla 5: Concentraciones de elementos Químicos ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) de PM10 y PST en Riohacha

Particulas	PST		PM10	
	Estación 1	Estación 2	Estación 1	Estación 2
Elemento	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
As	0,50	0,30	1,50	0,60
Cd	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ca	1884,40	1912,50	2653,10	1557,70
Zn	886,50	915,60	1949	323,70
Cu	78,90	12,40	524,40	1569,50
Cr	2	3,40	6,40	3,20
Co	320,90	90,40	3	3,30
Fe	361,80	189,80	256,30	467,70
Mg	140,40	119,90	427,60	333
Mn	4,30	3,30	4,10	6,50
Ni	2,90	5,30	4,60	4,70
Pb	4,10	5,05	7,90	5,30
K	1921,90	1949,50	395,30	186,30
Na	2928,60	2895	2157,10	1855
V	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Si comparamos estos resultados con el comportamiento de seis de estos metales (Pb, Fe, Cu, Zn, Ni, Mn) con los citados por Pachón y Sarmiento (2008) en estudio de Bogotá y tres ciudades latinoamericana (Buenos Aire, Santiago y Sao Paolo) se observa que las concentraciones de estos metales son muchos menores a estas ciudades, guardando las proporciones de flujo vehicular que en esta ciudades son mayores en comparación con Riohacha. De igual manera, al comparar el nivel de los metales hallados en la ciudad Riohacha con estudios de ciudades de menor tamaño que las anteriores, específicamente las ciudades de Bucaramanga y Pamplona, al nororiente de Colombia, se observa similitud en cuanto a la presencia de: Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn (Quijano *et al.*, 2010). En relación a los 15 elementos estudiados, Colombia solo dispone de regulación para el caso del Pb, Cd y V. La resolución 610 del 2010 de este país, establece niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos, a saber: el plomo con nivel permisible promedio de 24 horas de 1.50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cadmio con nivel permisible promedio anual de  $5 \times 10^{-3}$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y el vanadio con nivel permisible promedio de 24 horas de 1.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El V y Cd resultaron por debajo del límite de detención del método empleado.

La concentración más alta de Pb se presentó en las partículas PM10 y fue de 0,008  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación 1; lo que representa el 0,46 % del nivel de inmisión diario para este contaminante según la normativa colombiana. Adicionalmente sobre una base comparativa con los valores guías sugeridos para metales trazas en partículas atmosféricas por la USEPA (USEPA, 1996) y la Organización mundial de la Salud (WHO, 2005), puede concluirse que el Pb en las 2 estaciones para PM10 (0.008  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 0.005  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) resultó inferior a esos dos estándares internacionales para un monitoreo continuo de 24 horas.

#### Factor de enriquecimiento (FE)

El FE a menudo se utiliza para diferenciar entre elementos procedentes de las actividades humanas y fuentes naturales (Han *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2010; Cesari *et al.*, 2012) y se define generalmente como sigue (Lawson y Winchester, 1979):

$$FE(x) = \frac{\left(\frac{C_x}{C_R}\right)_{Aerosol}}{\left(\frac{C_x}{C_R}\right)_{Corteza}} \quad (1)$$

Donde  $x$  representa el elemento químico de interés,  $C_x$  representa la concentración del elemento de interés en el aerosol;  $C_{ref}$  es la concentración del elemento de referencia de la corteza terrestre que se utiliza comúnmente como tales como el Al, Si, Ti y Fe, etc. Así, en este estudio se seleccionó el Fe como elemento de referencia. En estos estudios generalmente es utilizado estudios de suelos locales para reducir el sesgo de los resultados; pero en vista que se carece de estudios de las características del suelo del área urbana de la ciudad de Riohacha, en este estudio se utilizó la corteza terrestre (Wedepohl, 1995) como el material de referencia. Las figuras 3 y 4 muestran los FE de 15 elementos en PM10 y PST, respectivamente. Ha sido bien establecido que los elementos con FE menor de 10 son debido a la emisión de la corteza terrestre mientras que los elementos con FE mayor que 10 son considerados altamente enriquecidos y proceden de fuentes antropogénicas.

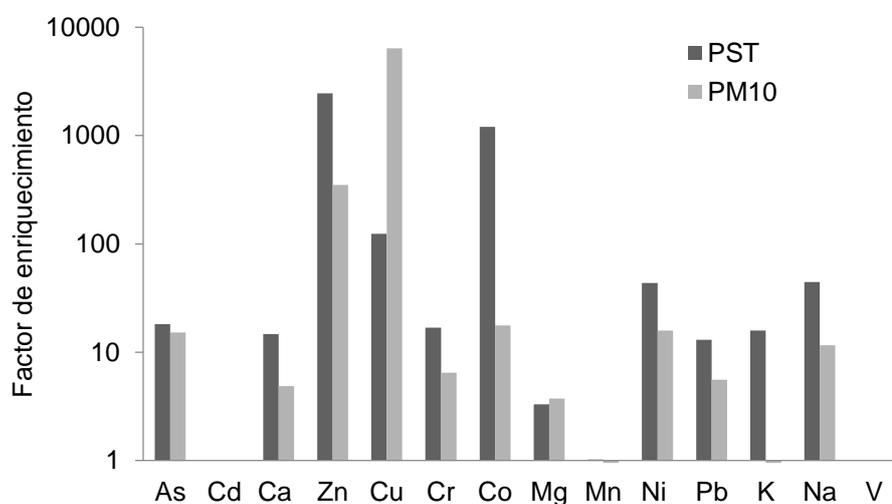


Fig. 3: Comparación de los factores de enriquecimiento de elementos traza en PST y PM10, Estación 1.

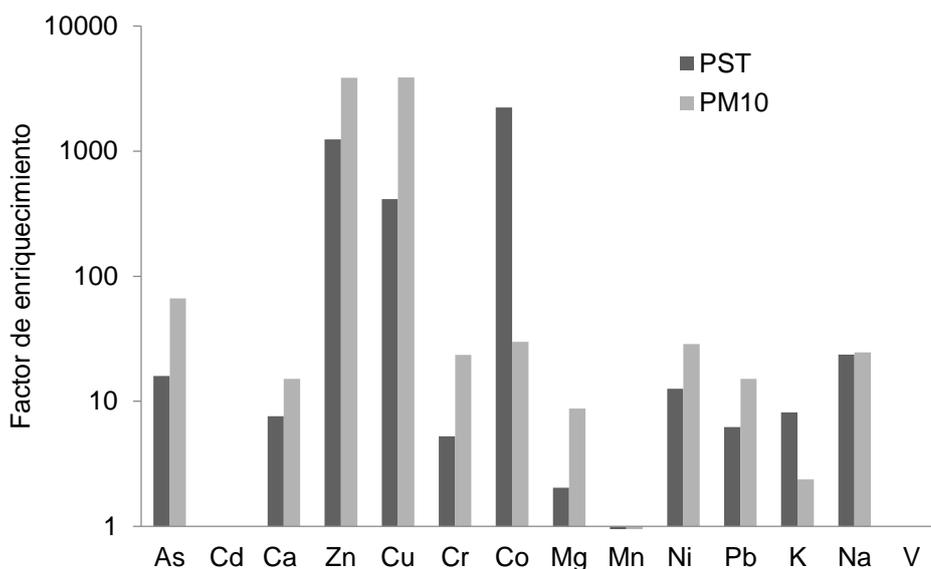


Fig. 4: Comparación de los factores de enriquecimiento de elementos traza en PST y PM10, Estación 2.

En general, todos los elementos en las estaciones 1 y 2, excepto As, Ni y Na mostraron mayor enriquecimiento del material particulado PM10 que en las PST. De los elementos que anteriormente se mencionaron como elementos parcialmente antropogénicos, el Zn, Cu y Co, mostraron un fuerte enriquecimiento en las dos estaciones tanto en PM10 (FE >100) como en PST (FE >100), lo que indica que se originaron a partir de fuentes antropogénicas, posiblemente del parque automotor. Para el otro grupo de elementos (trazadores de suelo) tales como Na, As, Pb y Ni, los valores de FE variaron de 10 a 100 en PM10 y PST en las dos estaciones, presentándose un enriquecimiento moderado, lo que indica otra fuente de enriquecimiento adicional al suelo está participando. Elementos como el Mg, Mn, V y K su origen es de un proceso natural del suelo. El Pb que es un elemento regulado por la legislación Colombiana, No excedió el nivel máximo permisible y solo está presente en el materia particulado PM10, demostrándose que este elemento se encuentra en la fracción del material particulado inhalable PM10 (Balakrishnaiah *et al*, 2012). Los factores de enriquecimiento promedio, obtenidos con la relación de las concentraciones de Na con las concentraciones de K, Ca y Mg, aerosoles de origen comúnmente marinos, fueron menores a 10, lo cual sugiere fuentes de origen natural posiblemente aerosoles marinos.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguientes:

- 1) de acuerdo a los estudios realizados, en los 2 sitios de muestreo, los resultados de las concentraciones de PM10 y PST, no violan los estándares diario, para un periodo de muestreo de 24 horas de la norma Colombiana y la National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) de los Estados Unidos;
- 2) elemento como el Pb, considerado por la legislación colombiana como contaminante no convencional con efectos carcinogénicos, no alcanzó el nivel máximo permisible, pero se destaca su presencia en partículas inhalables;
- 3) el análisis Factor de Enriquecimiento reveló que Zn, Cu y Co son originadas por fuentes antropogénicas, mientras que Cd, Ca, Cr, Mg, Mn y K son de fuentes naturales, posiblemente sales marinas;
- 4) los elementos As, Zn Cu fueron los elementos más importantes en las partículas PM10, mientras que Co y Na fueron los elementos principales en las partículas PST. En general, todos los elementos, excepto el As, Ni y Na, mostraron un mayor enriquecimiento en las partículas PM10 en relación a las partículas PST.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de La Guajira (Colombia), al programa Estrategia de Sostenibilidad 2013-2014 de la Universidad de Antioquia (Colombia), al proyecto "Evaluación del impacto ambiental a mesoescala de la explotación de carbón a cielo abierto en la región norte de Colombia empleando herramientas de modelación atmosférica" cod. PRG13-2-07 y al IDEAM (Colombia) por suministrar los datos meteorológicos.

**REFERENCIAS**

- Álvarez, L. y A. Salazar, Síntomas respiratorios y función pulmonar en niños de 6 a 14 años de edad y su relación con la contaminación por material particulado PM10 en Santa Marta Colombia, *Rev Esp Salud Pública*, 87(3), 239-246 (2013).
- Angulo L.C., J.I. Huertas y G.M. Restrepo, Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto, *Información Tecnológica*: 22(4), 23-34 (2011).
- Balakrishnaiah, G., Han, W., Chun-Nan, L., Amit, A., Shih-Chieh, H., Chuen-Jinn, T., Gwo-Dong, R., Yue-Chuen, W., y Chung-Fang, C. Source Characterization and Apportionment of PM10, PM2.5 and PM0.1 by Using Positive Matrix Factorization. *Aerosol and Air Quality Research*: 12(4), 476-491 (2012).
- Bessagnet, B., A. Hodzic, R. Vautard, M. Beekmann, S. Cheinet, C. Honore, C. Liousse y L. Rouil, Aerosol modeling with CHIMERE-preliminary evaluation at the continental scale. *Atmospheric Environment*: 38(18), 2803-2817 (2004).
- Cabeza, D. Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Centro De Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. CIOH, Boletín Científico. Riohacha, Colombia 4-10 (2009).
- Candanoza, S., L. Goribar L. y F. García, Relación partículas respirables (PM10)/partículas suspendidas totales (PST) en Santa Marta (Colombia), *Dyna*, 179(80), 157-164 (2013).
- Cano, Y., J. Morales, J. Torres, L. Sánchez y B. Montilla, Evaluación de especies inorgánicas solubles en las lluvias de la ciudad de Maracaibo, Venezuela. IV Congreso colombiano y conferencia internacional de calidad del aire y salud pública, Libro de Memorias, 159-167, Bogotá, Colombia 13 al16 de Agosto (2013a).
- Cano, Y., J. Morales, J. Torres, O. Barroso, J. Pérez y B. Montilla, Concentraciones de los metales tóxicos Pb, V, Ni y Cd en partículas inhalables PM10 en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo, Venezuela. Años 1996 y 2009, IV Congreso colombiano y conferencia internacional de calidad del aire y salud pública, Libro de Memorias, 151-158, Bogotá, Colombia 13 al16 de Agosto (2013b).
- Castro, H., P. Millian, y J. Calderón, Análisis de ozono troposférico generada por la distribución ilegal de gasolina / ACPM en Maicao y Riohacha, IV Congreso colombiano y conferencia internacional de calidad del aire y salud pública, Libro de Memorias, 189-196, Bogotá, Colombia 13 al16 de Agosto (2013).
- Cesari, D., D. Contini, A. Genga, M. Siciliano, C. Elefante, F. Baglivi y L. Daniele. Analysis of raw soils and their re-suspended PM10 fractions: Characterisation of source profiles and enrichment factors. *Applied Geochemistry*, 27(6), 1238-1246 (2012).
- COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales. Productos derivados del petróleo. Gasolina sin plomo para motores de combustión interna. Norma Venezolanas, COVENIN 3457. Venezuela (1999).
- García, N., Criterios a considerar en la planificación de una red de monitoreo atmosférico. Trabajo de ascenso docente, Escuela de Ingeniería Química. La Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (1999).
- Gualtieri, M., J. Ovrevik, J.A. Holme, M.G. Perrone, E. Bolzacchini, P.E. Schwarze y M. Camatini, Differences in cytotoxicity versus pro-inflammatory potency of different PM fractions in human epithelial lung cells. *Toxicology in Vitro*: 24(1), 29-39 (2010).
- Han Y.M., J.J. Cao, Z.D. Jin, y Z.S. AnHan, Elemental composition of aerosols in Daihai, a rural area in the front boundary of the summer Asian monsoon. *Atmospheric Research*: 92(2), 229-235 (2009).
- Hinwood, A., A.C. Callan, J. Heyworth, P. McCafferty y P.D. Sly, Children's personal exposure to PM10 and associated metals in urban, rural and mining activity areas, *Chemosphere*: 108(8), 125-133 (2014).
- Lim, Jong-Myoung, Jin-Hong Lee, Jong-Hwa Moon, Yong-Sam Chung y Ki-Hyun Kim. Airborne PM10 and metals from multifarious sources in an industrial complex area. *Atmospheric Research*: 96(1), 53-64 (2010).
- Machado A., N. García, C. García, L. Acosta, A. Córdova, M. Linares, D. Giraldoth y H. Velásquez, Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 24(4), 171-182 (2008).
- MADS, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. 1ª edición. Bogotá, Colombia (2010).

- Muránszky, G., M. Óvári, I. Virág, P. Csiba, R. Dobai y Z. Gyula, Chemical characterization of PM10 fractions of urban aerosol, *Microchemical Journal*: 98(1), 1-10 (2011).
- Pachón, J. E. y V.H. Sarmiento, Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquía*: 43(1), 120-133 (2008).
- Pope, C.A., y D.W. Dockery, Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*: 56(6), 709-742 (2006).
- Quijano, A., M. Parra, J. Quijano y J.A. Henao, Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia, *Revista Bistua Facultad de Ciencias Básicas universidad de Pamplona*, 8(1); 53-66 (2010).
- Ravindra, K., L. Bencs, y R. Van Grieken, Platinum group elements in the environment and their risk assessment, *The Science of the Total Environment*: 318(1), 1-43 (2004).
- Rojano, R., J. Perez y E. Freyle, Effect of relative humidity in determining PM10 using a DataRam 4 in coastal region of Colombia, *Revista Técnica Ingeniería Universidad del Zulia*: 35(2), 1-9 (2012).
- Rojano, R., J. Pérez y J. Deluque, Análisis comparativo de las mediciones de material particulado PM10. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*; 58(1), 27-35 (2011).
- Rojano, R., L.C. Angulo y G. Restrepo, Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano. *Inf. tecnol. [online]*, 24(2), 37-46 (2013).
- Romanazzia, V., M. Casazzab, M. Malandrinoc, V. Maurinoc, A. Pianob, T. Schiliròa y G. Gillia, PM10 size distribution of metals and environmental-sanitary risk analysis in the city of Torino. *Chemosphere*: 112(10), 210–216 (2014).
- Vázquez C., F. Beristain y E. Audelo, Caracterización del Patrón de Comportamiento de las Partículas en Suspensión en el Valle de México, *Información Tecnológica*: 23(3), 3-10 (2012).
- Wang, X., X. Bi, G. Sheng y J. Fu J, Chemical composition and sources of PM10 and PM2.5 aerosols in Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*: 119(1-3), 425-439 (2006).
- Wedepohl, H.K., The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1232 (1995).