

Caracterización de Partículas Suspendidas (PST) y Partículas Respirables (PM₁₀) producidas en Áreas de Explotación Carbonífera a Cielo Abierto

Luis C. Angulo⁽¹⁾, José I. Huertas⁽²⁾ y Gloria M. Restrepo⁽³⁾

(1) Univ. Popular del Cesar, Grupo de Inv. en Geología, Minería y Ambiente GIGEMA-CIDTEC, Sede Hurtado, Valledupar, Cesar-Colombia (e-mail: lcangulo@unicesar.edu.co)

(2) Tecnológico de Monterrey, Centro de Inv. en Mecatrónica Automotriz-CIMA, Ed. Monroy Cárdenas 2000, San Antonio Buenavista C.P. 50110, Toluca-México (e-mail: jhuertas@itesm.mx)

(3) Univ. de Antioquia, Sede de Investigación Universitaria SIU, Grupo Procesos Físicoquímicos Aplicados PFA, Cra. 53 # 61 - 30 Medellín, Colombia (e-mail: gloma@udea.edu.co).

Recibido Sep. 14, 2010; Aceptado Nov. 12, 2010; Versión Final recibida Ene. 14, 2011

Resumen

Se presenta una revisión de la literatura sobre la cuantificación y caracterización de partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM₁₀) producidas en áreas de explotación carbonífera a cielo abierto. El material particulado es un contaminante complejo por sus características físicas (distribución de tamaño de partícula, morfología y densidad) y por sus características químicas (compuestos orgánicos e inorgánicos, metales y contaminantes primarios y secundarios). Estas características son críticas para determinar el tipo y magnitud de los efectos sobre la salud humana. Se encontró que los trabajos realizados, han empleado experimentos de laboratorio y de campo, así como estudios de modelación. Esta revisión bibliográfica contribuye a una mejor comprensión y evaluación de las tecnologías que se deben usar para encontrar soluciones a este problema de contaminación.

Palabras clave: partículas suspendidas, partículas respirables, PM₁₀ y PST, mina de carbón

Characterization of Total Suspended Particles (TSP) and Inhalable Particulate Matter (PM₁₀) generated in Open Pit Coal Mining Areas

Abstract

This article presents a literature review about the quantification and characterization of total suspended particles (TSP) and inhalable particulate matter (PM₁₀) generated in open pit coal mining areas. Particle matter is a complex pollutant due to its physical characteristics (particle size distribution, morphology and density) and its chemical characteristics (organic and inorganic components, metals, and primary and secondary pollutants). These characteristics are critical to determine the type and the magnitude of their effects on human health. It was found that the different works published in the literature have used lab and field experiments, and also modeling studies. This literature review contributes to improve the understanding and evaluation of technologies that must be used to find solutions to this atmospheric pollution problem.

Keywords: suspended particles, inhalable particulate matter, PM₁₀ and TSP, coal mining

INTRODUCCIÓN

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 MP y a los contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera (Ghose, 2007). No solo afecta el interior de las minas, sino también a las áreas de influencia externas. En la minería a cielo abierto, una gran cantidad de estéril es removido para destapar los depósitos minerales. Esto requiere excavadoras, vehículos de transporte, cargadores, bandas transportadoras, etc. Usualmente la explotación de carbón a cielo abierto involucra las siguientes actividades generales: 1. manejo de suelos (descapote, transporte y almacenamiento), 2. Perforación y voladura de material estéril, 3. Manejo de estéril (cargue, transporte y descarga) del estéril a zona de botaderos, 4. Manejo de carbón (Cargue, transporte y descargue de carbón a zona de acopio) y 5. Otras operaciones (erosión eólica, mantenimiento de vías y tráfico de vehículos).

La figura 1 presenta los 10 países con mayor producción y exportación de carbón a nivel mundial. Se observa que durante 2009, China fue el mayor productor a nivel mundial con 2971 Mton/año, seguido por USA con una producción de 919 Mton/año. Cabe resaltar que entre los países latinoamericanos, Colombia se encuentra a la vanguardia con una producción de 73 Mton anuales (IEA, 2010). Adicionalmente la figura 1 muestra que durante el año 2009 Australia fue el primer exportador de carbón con 262 Mton/año, seguido por Indonesia con 230 Mton/año. Aunque China es el país con mayor producción a nivel mundial; importó 114 Mton en 2009 y Estados Unidos, quien es el segundo productor de carbón, exportó alrededor del 4% de su producción total.

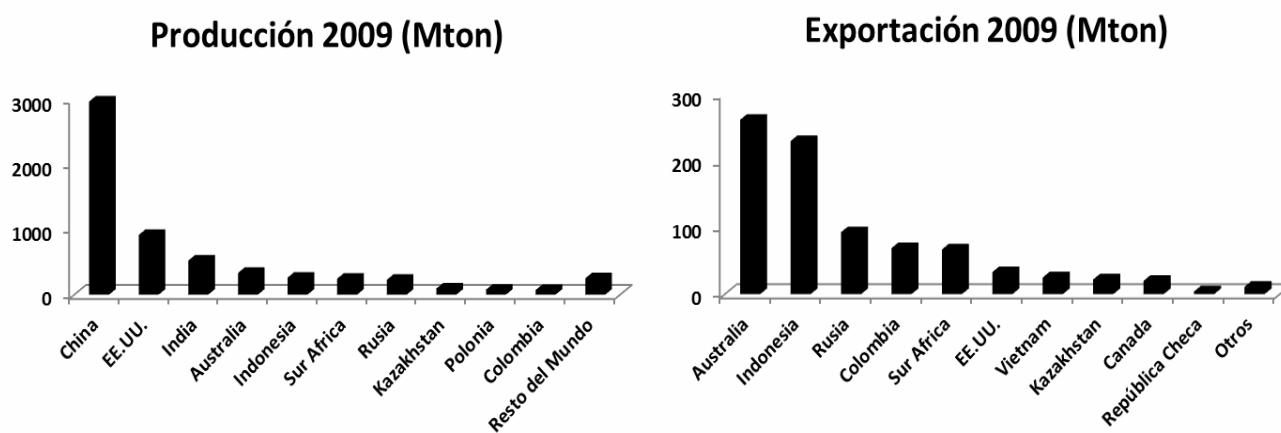


Fig. 1: Los 10 países con mayor producción de carbón a nivel mundial (IEA, 2010).

Los países con altas inversiones en la industria minera son conscientes del peligro potencial que las emisiones de material particulado (MP) pueden causar a corto y largo plazo, dando lugar a la introducción de nuevas directrices, planes, reglamentos y normas (Petavratzi et. al, 2005).

El principal problema de contaminación atmosférica en una zona minera se debe a la presencia de partículas, las cuales pueden ser de carbón, suelo o estéril (Ghose y Majee, 2000). Estas partículas son emitidas a la atmósfera por acción del viento, las fuentes de combustión, los puntos de transferencia de material u otras fuentes en el sitio de la mina. Las fuentes de contaminación del aire pueden dividirse en dos categorías, fuentes puntuales y fuentes fugitivas. Las fuentes puntuales típicamente incluyen chimeneas estacionarias (Ghose y Majee, 2000). En contraste, las fuentes fugitivas son abiertas, tales como los suelos y las pilas de carbón expuestos a la erosión del viento (Ghose y Majee 2000).

Para propósitos de modelación de la dispersión de MP en áreas circunvecinas, estas actividades son reclasificadas en términos de las áreas donde ocurren de la siguiente forma y de acuerdo con el proceso de producción: 1. Tajo, 2. Botadero, 3. Acopio y 4. Vías de transporte (Figura 2).

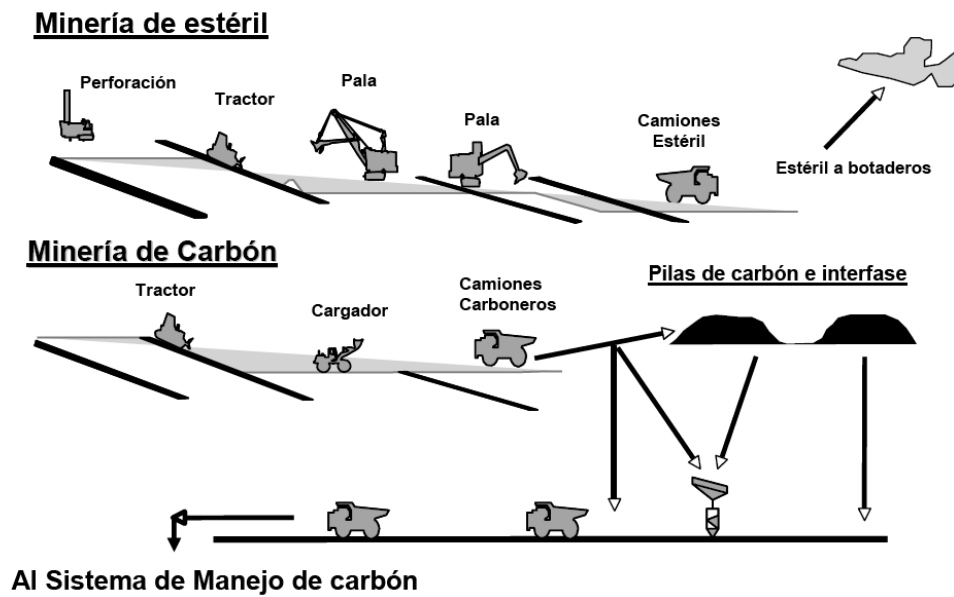


Fig. 2: Proceso de producción de minería de carbón a cielo abierto (Cerrejón, 2009).

CUANTIFICACIÓN DE PST Y PM₁₀

Diferentes autores han llevado a cabo estudios de las fuentes de emisión, con el propósito de determinar la tasa de emisión de varias actividades mineras (Chaulya et al., 2002). Zeller et al. (1979), Cowherd (1982), US-EPA (1995a) y Australia EPA (1996) determinaron fórmulas empíricas para la establecer las tasas de emisión en actividades carboníferas. Thompson y Visser (2001) describieron las emisiones de material particulado fugitivo y la exposición de las características asociadas con camiones de transporte pesado que transitan en minas a cielo abierto. Describieron modelos para evaluar la exposición al material particulado dependiendo del material de la vía en función de la carga de la superficie, el tipo de tráfico y volumen transportado y los parámetros de diversos materiales.

Estudios completos desarrollados por la British Columbia Hydro and Power Authority (1979) en áreas mineras de carbón a cielo abierto, se llevaron a cabo en el noroeste de los Estados Unidos y el oeste de Canadá, en los cuales evaluaron el potencial de los niveles de MP fugitivo en la región y la identificación de medidas específicas de control; para esto, utilizaron factores de emisión teóricos y técnicas informáticas de modelización. Para cuantificar la emisión de material particulado se hace uso de la siguiente ecuación:

$$E = A E_f (1 - \eta) \tag{1}$$

Donde

- E : Emisión
- A : Intensidad de la actividad llevada a cabo
- E_f : Factor de emisión
- η : Eficiencia de la medida de control

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, soportado en trabajos de varios autores como Axetell (1978), Shearer, et al (1981), Axetell y Cowherd (1981), Muleski (1990, 1994), edito los factores de emisión del AP-42 relacionados con la cuantificación de emisiones en zonas mineras de carbón a cielo abierto, los cuales han sido desde entonces aplicados en diversos estudios de este tipo. Huertas et al. (2009) revisaron estos factores y desarrollaron una

metodología unificada para estimar emisiones en minas de explotación de carbón a cielo abierto con base en los parámetros de operación de la mina. Las tablas 1 y 2 muestran las operaciones consideradas y el factor de emisión correspondiente.

Tabla 1: Clasificación de las actividades involucradas en la explotación de carbón a cielo abierto.

Operación	Subactividad	Ecu. ID		Clasificación por área fuente
		PST	PM ₁₀	
Manejo de suelo	Remoción de suelo por trailla (scraper)	1	0	Pit
	Remoción	2	20	Pit
	Carga de suelo	3	21	Pit
	Transporte de suelo	4	22	Pit 25%, botadero 25%, vías 50%
	Descarga de suelo	5	21	Botadero
Perforación y voladura (Carbón y sobrecarga)	Perforación	6	0	Pit
		7	0	Pit
	Voladura	8	23	Pit
		8	23	Pit
Manejo de estéril (forma tradicional)	Empuje de estériles en pits	9	24	Pit
	Carga de estériles a camiones	3	21	Pit
	Transporte de estériles por camiones	4	22	Pit 25%, botadero 25%, vías 50%
	Descarga de estériles	10	21	Botadero
	Empuje de estériles en el botadero con bulldozer	9	24	Botadero
Manejo de estériles con dragline y banda transportadora	Movimiento de estériles a vehículos con dragline a retrorelleno	11	25	Pit
	Cargue de estériles a vehículos con dragline	11	25	Pit
	Empuje de estériles en pits para alimentador	9	24	Pit
	Cargue de estériles a vehículos con bulldozer y/o alimentador	3	21	Pit
	Transporte de estériles	4	22	Pit 25%, botadero 25%, vías 50%
	Descargue de estériles desde camión	10	21	Botadero
	Transporte de estéril en banda	3	21	Pit
	Descarga de estéril de la banda transportadora	10	21	Botadero
	Empuje de estériles en el botadero con bulldozer	9	24	Botadero
Manejo de carbón	Empuje de carbón en mantos	2	20	Pit
	Cargue de carbón a camión	12	26	Pit
	Transporte de carbón por camión	4	22	Pit 25%, Botadero 25%, vías 50%
	Descargue de carbón desde camión a zona de almacenamiento	13	21	Patio
	Apilado de carbón con bulldozer en zona de almacenamiento	2	20	Patio
	Cargue del carbón al tren	14	21	Patio
	Transporte por tren	15	0	Vías
Otras operaciones	Erosión eólica en pilas de carbón	16	27	Patio
	Erosión eólica en áreas intervenidas	17	27	Botadero
	Mantenimiento de vías	18	28	Pit
	Tráfico de vehículos livianos	19	29	Pit 25%, botadero 25%, vías 50%

Tabla 2: Factores de emisión de TSP y PM₁₀ usados para cada sub-actividad involucrada en minería a cielo abierto.

<i>Ecuación</i>	<i>Unidades</i>	<i>Ecuación ID</i>	<i>Referencia</i>
0.029	kg PST/Ton	1	(U.S. EPA., 2008)
$35.6 \frac{s^{1.2}}{M^{1.4}}$	kg PST/h	2	(U.S. EPA., 2008)
$0.0012 \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}, 0.018^*$	kg PST/Ton	3	(U.S. EPA, 2006.b)
$1.38 \left(\frac{s}{12}\right)^{0.7} \left(\frac{W}{3}\right)^{0.45} \left(\frac{n-m}{n}\right)(1-\eta_r)$	kg PST/VKT	4	(U.S. EPA 2006.a; Cowherd, 1988)
$0.0012 \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}, 0.02^*$	kg PST/Ton	5	(U.S. EPA, 2006.b; 2008.)
0.59	kg PST/hole	6	(U.S. EPA, 2008)
0.1	kg PST/hole	7	(U.S. EPA, 2008)
$0.00022A^{1.5}$	kg PST/blast	8	(U.S. EPA, 2008)
$2.6 \frac{s^{1.2}}{M^{1.3}}$	kg PST/h	9	(U.S. EPA, 2008)
$0.0012 \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}, 0.001^*$	kg PST/Ton	10	(U.S. EPA, 2006.b; 2008.)
$0.0046 \frac{d^{1.1}}{M^{0.3}}$	kg PST/m ³	11	(U.S. EPA, 2008)
$\frac{0.58}{M^{1.2}}$	kg PST/Ton	12	(U.S. EPA, 2008)
$0.0012 \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}, 0.033^*$	kg PST/(Ton- coal)	13	(U.S. EPA, 2008)
$0.0012 \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}, 0.014^*$	kg PST/(Ton- coal)	14	(U.S. EPA, 2008)
$1.8(U^*)$	Kg PST/(Ha h)	15	(U.S. EPA, 2008)
$1.8(U)$	Kg PST/(Ha h)	16	(U.S. EPA, 2008)
0.85	Ton PST/(Ha-year)	17	(U.S. EPA, 2008)
$0.0034(S)^{2.5}$	kg PST/VKT	18	(U.S. EPA, 2008)
$\frac{1.6914 \left(\frac{s}{12}\right) \left(\frac{S}{30}\right)^{0.3}}{\left(\frac{M}{0.5}\right)^{0.3}} - 1.325E-4$	kg PST/VKT	19	(U.S. EPA, 2006.a)
$0.75(8.44) \frac{s^{1.5}}{M^{1.4}}$	kg PM ₁₀ /(h bulldozer)	20	(U.S. EPA, 2008)
$0.00056 \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}}$	kg PM ₁₀ /Ton	21	(U.S. EPA, 2006.)
$0.423 \left(\frac{s}{12}\right)^{0.9} \left(\frac{W}{3}\right)^{0.45} \left(\frac{n-m}{n}\right)(1-\eta_r)$	kg PM ₁₀ /VKT	22	(U.S. EPA, 2006.a.; Cowherd, 1988)
$0.52 (0.00022)A^{1.5}$	kg PM ₁₀ /blast	23	(U.S. EPA, 2008)
$0.75 (0.45) \frac{s^{1.5}}{M^{1.4}}$	kg PM ₁₀ /h	24	(U.S. EPA, 2008)
$0.75(0.0029) \frac{d^{0.7}}{M^{0.3}}$	kg PM ₁₀ /m ³	25	(U.S. EPA, 2008)
$0.75 \frac{0.0596}{M^{0.9}}$	kg PM ₁₀ /Ton	26	(U.S. EPA, 2008; Missouri Department of Natural Resources., 2007)
$9.5E-5 \left[\frac{s}{1.5} (b) \left(\frac{c}{235}\right) \left(\frac{e}{15}\right) \right]$	Kg PM ₁₀ /(m ² year)	27	(Missouri Department of Natural Resources., 2007)
$0.60 (0.0056) S^{2.0}$	kg PM ₁₀ /VKT	28	(U.S. EPA, 2008; Missouri Department of Natural Resources., 2007)
$\left(\frac{0.507 \left(\frac{s}{12}\right) \left(\frac{S}{30}\right)^{0.2}}{\frac{M}{0.5}^{0.5}} \right) \left(\frac{n-m}{m}\right)(1-\eta_r)$	kg PM ₁₀ /VKT	29	(U.S. EPA, 2006.a; Cowherd, 1988)

Adicionalmente, se consideraron las tecnologías de control de emisiones existentes y que son usadas por las empresas mineras. La metodología fue aplicada a 6 de las 7 minas que operan en el norte de Colombia para los años 2008, 2009 y 2010. En este estudio se concluyó que en promedio todas las empresas mineras producen 0.726 kg de PST y 0.180 kg de PM₁₀ por tonelada de carbón extraído. También se observó, que en promedio para todas las empresas, la fuente de emisión que emite la mayor cantidad de material particulado (42%) corresponde al tajo para el caso de PST y el botadero (60%) para el caso de PM₁₀.

Se ha identificado que el tráfico vehicular en vías de acarreo ha sido identificado como la más prolífica fuente de MP fugitivo, y puede contribuir con cerca del 80% del total de MP emitido. Cowherd et al. (1982) estimó que alrededor del 50% del total de MP, es lanzado durante el tiempo de viaje de un equipo de acarreo en una vía de transporte no pavimentada, mientras que el 25% es lanzado durante el cargue y descargue del equipo de acarreo. Chadwick et al. (1987) estimó que el 0.02% del carbón se pierde durante el cargue y descargue. Nair y Singh (1990) determinaron que el MP en las vías de acarreo contiene más del 4% de MP respirable. Otra fuente importante de material particulado fugitivo es la erosión del viento en las pilas. Jacko (1983) también estimó el material particulado fugitivo en las operaciones mineras.

Las tasas de emisión en una mina pueden ser diferentes a los estimados con base en los factores de emisión recomendados por la US-EPA debido a las diferencias en la naturaleza de la minería, sitios y prácticas de medidas de mitigación, geología y condiciones meteorológicas (CMRI, 1998). Por lo tanto se hace necesario desarrollar estudios experimentales que tengan en cuenta estas variaciones. En este sentido (Ghose y Majee, 2007) determinaron el poder nocivo del material MP aerotransportado alrededor de un área de minería de carbón a cielo abierto en la India, tomando como referencia investigaciones previas, en las cuales se demostró que el tráfico vehicular en minas mecanizadas a cielo abierto, puede contribuir a emitir material particulado hasta en un 80% (Cowherd, 1979). De igual forma se estimó que alrededor del 50% del material de carbón es lanzado durante el tiempo de viaje en una vía de acarreo destapada, mientras que el 25% es lanzado durante el cargue y descargue (Chadwick et al. 1987). La perforación es la siguiente fuente más importante de polvo fugitivo (Nair and Sinha, 1987). Finalmente, otra fuente importante de polvo fugitivo es debido a la erosión del viento sobre pilas de carbón.

CARACTERIZACIÓN DE PST Y PM₁₀

La caracterización de PST y PM₁₀ implica definir su composición, la distribución del tamaño de partícula y su morfología. A continuación se presentan algunos trabajos de caracterización de MP emitido en minas de carbón a cielo abierto cuyo principal énfasis está dado en la defunción de la composición del MP. En el estudio muestra que TSP fueron sometidas al análisis de tamaño de partículas utilizando el principio de foto-extinción y sedimentación a través de un Photosizer Micron, así como también fue realizado con un impactador de cascada. Se observó que el diámetro promedio era de alrededor 20 micrómetros. La variación de los porcentajes de peso para los diferentes rangos de tamaño fue discutido en función de cada actividad minera. Se requiere mayor investigación para determinar la distribución de tamaño de MP en los alrededores de zonas mineras.

Pless et al. (2000) analizaron en el noreste de Inglaterra, las muestras colectadas entre 10 y 100 micras, las cuales fueron caracterizadas a través de SEM-EDS (Microscopía Electrónica de Barrido acoplada con Espectroscopia de Dispersión de Energía). Las partículas encontradas fueron pizarras (indicador típico de partículas derivadas de actividad minera a cielo abierto), hollín, cenizas, carbón, material biológico, cuarzo y otras. De igual modo, fueron registrados el número y tamaño de partícula, forma y esfericidad. Otros autores, han caracterizado partículas aerotransportadas colectadas dentro y próximas a una mina de carbón a cielo abierto en el Sur de Gales, U.K. En esta misma línea de investigación, emprendió un análisis ambiental del MP en la región de minería a cielo abierto del Sur de Gales; usando una combinación entre difracción de rayos X y análisis SEM, reconocieron 10 ocurrencias minerales: cuarzo, basanita (CaSO₄•1/2H₂O), halita, calcita, illita, clorita, kaolinita, montmorillonita (esmeclita), dolomita y feldespatos. Es importante resaltar, que los niveles y composición del MP generado por la minería de carbón a

cielo abierto, están influenciados por la geología local y el progreso de las operaciones mineras, con consideraciones adicionales que incluyen la topografía del tajo, la efectividad de las medidas de control de emisiones de MP y las condiciones meteorológicas. En el PM₁₀ generado a partir de minería a cielo abierto, se ha determinado que contiene una significativa cantidad de partículas de diesel producto de las emisiones de los motores (Munro y Crompton, 1999). De manera general para este estudio, los materiales y métodos incluyeron Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), a través del cual las muestras fueron examinadas con imágenes de alta resolución en un Philips XL30 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) en modo electrónico secundario (Burnstock y Jones, 2001). Las muestras fueron también analizadas por SEM-EDX usando un Cambridge S360 con un Oxford Instruments AN10000 Energy-Dispersive Analyser. Un mínimo de 40 partículas fueron analizadas por cada filtro.

Jones et al., (2006) revisaron los métodos de recopilación y caracterización utilizados en las investigaciones, seleccionaron cuatro lugares principales de recolección de datos; entre ellos la mina de carbón a cielo abierto Parque del Oeste; para esto, usaron un sistema de retención (impactador de partículas) desarrollado en la Universidad de Harvard pero adaptado y optimizado en la Universidad de Cardiff. Desarrollaron métodos para la extracción de partículas de los filtros de PM₁₀ (filtros de policarbonato y poliuretano) con el propósito de reducir al mínimo los cambios físicos o químicos en la extracción y para evaluar su bioreactividad de una manera apropiada. La caracterización físico-química de las partículas PM₁₀ incluyó la medición empírica de la forma y el tamaño por microscopía electrónica y análisis de imágenes semi-automatizado. La determinación de los componentes químicos solubles e insolubles en agua, se llevó a cabo por cromatografía de iones y por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.

En las áreas carboníferas del Cesar y La Guajira, Colombia, existen redes de monitoreo de calidad del aire. Los operadores de estas redes periódicamente analizan, a nivel mineralógico, filtros provenientes de estos monitoreos. Durante los años 2007, 2008 y 2009 los análisis los realizó el Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), utilizando difracción de rayos X y análisis óptico con microscopio petrográfico. Los resultados obtenidos muestran porcentaje de partículas carbonosas entre el 30 y 40% y de partículas de estéril entre 40 y 50%. Además, encontraron cuarzo, feldespatos, granos alterados, epidota, biotita y piroxenos y en menor cantidad muscovitas, cloritas, calcitas y fragmentos orgánicos.

CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS MINERAS

Desde hace mucho tiempo, se sabe que respirar el MP que se produce en las minas es perjudicial para la salud. Georgius Agrícola, científico alemán en (De Re metálica, 1556), ya hablaba de los efectos dañinos del MP inhalado por los mineros. La exposición de los trabajadores en las minas a cielo abierto varía de 3-5 mg/m³ en frentes de arranque de carbón y 1-2 mg/m³ en fases de arranque de estéril. Después de las vías de acarreo, la perforación es tal vez la próxima fuente más importante de polvo fugitivo. Durante la perforación de los bancos de estéril, la concentración de polvo varía entre 20-25 mg/m³, y en bancos de carbón varía entre 1-30 mg/m³.

Chaulya (2003) con base en mediciones de campo, estableció las excedencias de la norma de calidad del aire en la India y recomendó la utilización de cinturones verdes alrededor de esas áreas que superaban dichas excedencias. De acuerdo con otros trabajos, se ha determinado que en áreas de operación minera a cielo abierto las máximas concentraciones de material particulado generalmente se presentan durante el verano y se minimizan en las áreas con estaciones lluviosas (Chaulya, 2004, Karaca et al., 1995; Soni y Agarwal, 1997; CMRI, 1999; Ghose y Majee, 2000; Tayanc, 2000; Nanda y Tiwary, 2001; Reddy y Ruj, 2003). Los muestreos y análisis fueron hechos dos veces al mes para áreas residenciales (zona intermedia) y seis veces al mes para áreas industriales (zona base/área minera) durante un año desde septiembre de 1998 hasta agosto de 1999. La ubicación de diecisiete estaciones de muestreo de aire (cuatro en el área de mina y trece en la zona residencial), se hizo con base en la prevalencia de las condiciones micro-meteorológicas según lo dispuesto en cada área y la disponibilidad de infraestructura. El material particulado total suspendido (PST), el material particulado respirable (PM₁₀), dióxido de sulfuro (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NOx) fueron muestreados. Las muestras fueron colectadas durante

un mes con un mínimo de dos muestras por área residencial y seis muestras para el área industrial. La variación espacial y temporal del material particulado fue analizada a partir de los trabajos de Christakos y Hristopulos (1996), Vyas y Christakos (1997), Christakos y Vyas (1998), Panago et al., 1998, Christakos (1998, 2000), Christakos y Serre (2000) y Cristakos et al. (2001, 2002). La variación temporal de las concentraciones de PST y PM₁₀ fue evaluada para establecer la tendencia estacional usando análisis de regresión polinómico y obtener la línea de mejor ajuste (Monn et al., 1995; Tayanc, 2000; Salvador et al., 2001; Jones et al., 2002; Triantafyllou et al., 2002; Triantafyllou, 2003; Triantafyllou y Kassomenos, 2002). La técnica de interpolación kriging fue usada para obtener la distribución espacial del material particulado para un periodo anual (Delfiner y Delhomme, 1975; Journel y Huijbregts, 1978; Cressie, 1991; Tayanc, 2000; Triantafyllou, 2001).

A partir de este mismo trabajo Chaulya (2005), determinó el estado de la calidad del aire de un área de minería a cielo abierto en la India; teniendo en cuenta las mediciones de PST y PM₁₀ por diferencia de peso. Las veinticuatro horas de datos medidas para todas las estaciones de monitoreo durante un año, fueron analizadas estadísticamente de acuerdo con lo planteado por Ott (1995) y los promedios anuales de contaminantes del aire fueron calculados para cada estación. Estos datos, fueron comparados con el protocolo NAAQS para cuantificar el estado de la calidad del aire en el área de estudio. Las estaciones de monitoreo fueron agrupadas en seis categorías para comparar el porcentaje de concentración de material particulado suspendido (TSP) y material particulado respirable con el respectivo límite estándar para cada área en particular. Finalmente, el análisis de regresión lineal fue corrido para derivar el mejor ajuste entre la ecuación y el coeficiente de correlación medido de partículas suspendidas y respirables (Tayanc, 2000).

Ghose (2006, 2007a,b,c) y Ghose y Banerjee (2008) utilizaron la técnica de análisis fractal para evaluar la contribución real de los contaminantes atmosféricos a la calidad del aire y los efectos después de la dispersión hacia los alrededores. Se examinaron las fuentes de contaminación del aire en el área de estudio y esta se centró en la superposición de los contaminantes atmosféricos emitidos por el proyecto. Se analizaron datos sobre la base de las direcciones del viento dominante en las diferentes estaciones para establecer el concepto de análisis fractal. Se concluyó que la contribución real de los contaminantes de la minería a cielo abierto y su dispersión, hacia sus alrededores, pueden ser evaluado con éxito mediante esta técnica.

Bindhulal y Pathak (2007) desarrolló un modelo para encontrar la concentración de material particulado suspendido en varios lugares lejos de la fuente, con la ayuda de redes neuronales artificiales. La red de percepción multicapas fue usada y el aprendizaje se realiza con un algoritmo de retropropagación (aprendizaje supervisado). Los datos para entrenar la red fueron tomados en el trabajo de campo realizado en las minas de carbón de Northkaranpura, Jharkhand, India. Se encontró que los rendimientos del modelo neuronal arrojaron mejores resultados que el modelo lineal.

En el estudio Addis et al. (1984) las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la zona de trabajo fueron seleccionadas cerca a las fuentes de contaminación del aire (Ghose y Banerjee, 1995). La calidad del aire en la zona de trabajo (alrededor de las fuentes de contaminación del aire) fue estudiada para medir el impacto en los trabajadores que realizan sus labores en el área y también para observar la cantidad de MP generado que es dispersado a la atmósfera y el nivel incrementa la contaminación del aire ambiental. Previamente, fue esencial conocer el nivel de concentración de fondo de calidad del aire, para poder determinar la contribución de contaminantes en el estudio.

En lo relacionado con aplicaciones estadísticas, Onder y Yigit (2008) seleccionaron un área minera de carbón a cielo abierto para obtener datos sobre emisiones específicas y recoger muestras de MP respirable. Estos niveles se analizaron para determinar la exposición de los mineros en cada una de las áreas entre 1994 y 2005. Estos datos fueron evaluados mediante el análisis de varianza (ANOVA) y el procedimiento de Tukey-Kramer. Los análisis se realizaron mediante el uso del software de estadística Minitab. Se concluyó que, las operaciones de

perforación producen niveles de concentración de MP elevadas y por lo tanto, los operadores de perforación pueden tener mayor incidencia de las vías respiratorias y trastornos relacionados con la exposición al MP en su entorno de trabajo. Del mismo modo, Pandey, et al. (2008) analizaron información básica sobre la caída anual de MP y sus constituyentes, así como la variación estacional de una zona subtropical en las minas de carbón a cielo abierto de Bina, India. A través de análisis de varianza, encontraron variaciones significativas en la sedimentación de MP en diferentes sitios, durante los meses y sus interacciones. La tasa de deposición de MP fue mayor durante el verano (marzo-junio), seguido de invierno (noviembre-febrero) y el menor en la temporada de lluvias (julio-octubre). La sedimentación máxima de MP se observó cerca de la planta de manejo del carbón y encontraron una relación inversa y significativa entre la caída de MP y la precipitación.

Por otro lado, se desarrolló una investigación para determinar la contaminación del aire causado por minería a cielo abierto y sus medidas de reducción en la India (Ghose y Majee, 2001), en la cual las fuentes de contaminación del aire fueron identificadas y las diferentes actividades mineras fueron registradas a lo largo de la producción del mineral. Los factores de emisión fueron utilizados para medir la generación de MP debido a diferentes actividades mineras (US-EPA, 1972, 1973; Dupery, 1968). En este caso, las concentraciones de PST se encontraron altas y excedían los límites permisibles exigidos por el Gobierno de la India ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para áreas industriales, $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para áreas residenciales y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para áreas sensibles) en todas las locaciones. Las estaciones de monitoreo de calidad del aire fueron ubicadas de acuerdo con la dirección dominante del viento (W y SW) en el área (Ghose y Banerjee, 1995). Esto incluyó colocar dos equipos de monitoreo viento arriba (W y SW), dos abajo (E y NE) y uno en el centro del proyecto.

CONCLUSIONES

Hasta la fecha, la mayor parte de los trabajos de investigación realizados en calidad del aire, se centran en estudiar la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles y fuentes fijas en zonas urbanas. Sin embargo, son pocos los trabajos relacionados con fuentes fugitivas. En el mundo existen múltiples países con importantes áreas de explotación minera a cielo abierto, las cuales son fuente de gran riqueza y a la vez fuentes fugitivas de material particulado con un gran impacto ambiental sobre las poblaciones aledañas. Los países donde se han realizado el mayor número de trabajos que buscan cuantificar y caracterizar el MP generado por la minería a cielo abierto son India, Reino Unido y USA.

La cuantificación de las emisiones de MP generado en zonas mineras a cielo abierto se realiza por medio de factores de emisión para cada actividad involucrada en el proceso de explotación minera. Existe una gran disparidad en las actividades consideradas en el inventario de emisiones. La mayoría de los trabajos usan los factores de emisión elaborados por la US-EPA y que esta entidad ha publicado para alguna de las actividades mineras. En pocos casos se han desarrollado factores de emisión propios que tengan en cuenta las condiciones atmosféricas y meteorológicas de cada zona minera en particular. Por tanto se requiere mayor investigación en la búsqueda de factores de emisión para las actividades no reportadas por la US EPA y en la adaptación de estos factores de emisión a las condiciones locales del área bajo estudio.

Se ha encontrado que la composición del MP generado por la minería de carbón a cielo abierto, están influenciada por la geología local y el progreso de las operaciones mineras, con consideraciones adicionales que incluyen la topografía del tajo. Sin embargo, se requiere mayor investigación en la determinación en la distribución de tamaño de partícula y descripción de la morfología de las mismas. No se han reportado estudios que cuantifiquen y caractericen partículas menores a 2.5 micras. Por lo tanto, se pueden utilizar las nuevas técnicas de caracterización química del MP, tales como espectroscopia de plasma acoplado inductivamente (ICP) y microscopía electrónica de transmisión (TEM).

Con el propósito de cuantificar la concentración de MP dentro y fuera de las minas, se han puesto en operación redes de monitoreo de calidad del aire. Así como también, se han usado diferentes

modelos de calidad del aire. Existe la oportunidad de aplicar los modelos de receptor para determinar los aportes de las fuentes de MP a la contaminación del aire en poblaciones alrededor de los proyectos mineros. La aplicación de estos modelos, debe estar acompañada de una metodología detallada y unificada de inventario de emisiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa “Estrategia de Sostenibilidad de Grupos” de la Universidad de Antioquia, al Consejo Colombiano de Ciencia y Tecnología-COLCIENCIAS y al Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz-CIMA del Tecnológico de Monterrey por el apoyo para la realización de este trabajo.

NOMENCLATURA

- s: Contenido de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías (%).
- M: Contenido de humedad del material manejado (%).
- d: Altura media de descarga (m).
- W: Peso promedio de los vehículos (toneladas cortas).
- p: Número de días en el mes con mínimo 0,254 mm de lluvia.
- CE: Eficiencia de control de polvo en vías no pavimentadas (%).
- A: Área horizontal de las voladuras con profundidad menor a 21 m. (m²).
- U: Velocidad del viento (m/s).
- U*: Velocidad promedio del tren (m/s).
- S: Velocidad promedio del vehículo (km/h).
- PST: Partículas suspendidas totales, llamadas también TSP por su sigla en inglés.
- VKT: Kilómetros viajados por un vehículo (km).
- b: Días de almacenamiento o exposición del material.
- c: Días secos en el año.
- e: % de tiempo con viento >5.33 m/s.
- * Los valores constantes se emplean cuando las variables de la ecuación respectiva no están dentro del rango de validez de la misma.

REFERENCIAS

Axetell, K., *Survey Of Fugitive Dust From Coal Mines*, EPA-908/1-78-003, U.S. Environmental Protection Agency, Denver, CO, February (1978).

Axetell, K., C. Cowherd, *Improved Emission Factors For Fugitive Dust From Western Surface Coal Mining Sources*, 2 Volumes, EPA Contract No. 68-03-2924, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, (1981).

Bindhulal y Gopal Pathak, *A Neural Model for SPM Concentration Prediction in Coal Mines*. Department of Civil Engineering, Birla Institute of Technology, Mesra, Ranchi - 835 215, India (2007).

Chaulya, S.K. y otros seis autores, *Development of empirical formulae to determine emission rate from various Opencast Coal Mining Operations*. Water, Air, and Soil Pollution, 140, 21-55 (2002).

Chaulya, S.K. y otros cinco autores, *Validation of two air quality models for Indian mining conditions*. Environmental Monitoring and Assessment 82: 23-43 (2003).

Chaulya, S.K., *Air quality standard exceedance and management in an Indian mining area*. Environmental Conservation, 30, 3, 266-273 (2003).

- Chaulya, S. K., *Assessment and management of air quality for an opencast coal mining area*. Journal of Environmental Management, 70, 1-14 (2004).
- Chaulya S.K., *Air Quality Status of an Open Pit Mining Area in India*. Environmental Monitoring and Assessment, 105, 369-389 (2005).
- Chadwick, M. J., N.H. Highton and N. Lindman, *Environmental Impacts of Coal Mining and Utilisation* (Pergamon Press, England) (1987).
- Corpocesar, Corporación Autónoma Regional del Cesar. *Informes de la Red de Calidad del Aire en la Zona Carbonífera del Cesar, Colombia* (2007-2009).
- Cowherd, C., *Measurements of fugitive dust emission from haul roads, Report N° EPA-600/7-79-182*. Research triangle Park, NC:USEPA, Industrial Environmental Research Lab. (1982).
- EPA, *Emission Factor Documentation for AP-42, Section 13.2.2, Unpaved Roads, Final Report for U. S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, MRI Project N° 4864* (1998).
- EPA, *Emission Factors for AP-42 Section 11.9, Western Surface Coal Mining, U.S. Environmental Protection Agency, MRI Project N° 4604-02* (1998).
- EPA, *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air, Compendium Method IO-3.4 Determination of Metals in Ambient Particulate Matter using Inductively Coupled Plasma (ICP) Spectroscopy* (1999).
- Ghose, M.K. y S.R. Majee, *Assessment of the impact on the air environment due to opencast coal mining an Indian case study*. Atmospheric Environment, 34, 2791-2796 (2000).
- Ghose, M.K. y S. R. Majee, *Air pollution caused by opencast mining and its abatement measures in India*. Journal of Environmental Management, 63, 193-202 (2001).
- Ghose, M.K., *Factal analysis of the dispersion of air pollutants*. International Journal of Environmental Studies, 63:2, 179-187 (2006).
- Ghose, M.K., *Opencast Coal Mining in India: Assessing Air Pollutant Emission Rates*. Environmental Quality Management, Autumn, 35-51 (2007a).
- Ghose, M.K., *Opencast Coal Mining in India: Analyzing and Addressing the Air Environmental Impacts*. Environmental Quality Management, Winter, 51-58 (2007b).
- Ghose, M.K., *Opencast Coal Mining in India: Development of Emission Factors and Quantification of Mine Dust Emission*. Environmental Quality Management, Spring, 71-87 (2007c).
- Ghose, M.K., *Generation and Quantification of Hazardous Dusts from Coal Mining in the Indian Context*. Environmental Monitoring Assessment, 130, 35-45 (2007d).
- Ghose, M.K y S. R. Majee, *Characteristics of Hazardous Airborne Dust Around an Indian Surface Coal Mining Area*. Environmental Monitoring Assessment, 130, 17-25 (2007).
- Ghose, M.K. y S. K. Banerjee, *Analyzing Sources of Air Pollution with Factal Analysis: Case Study from a Coal Washery in India*. Environmental Quality Management, Spring (2008).
- Huertas, J.I. y E. Vilchis, *Dispersión y deposición de material particulado en zonas de explotación minera a cielo abierto usando CFD*. Memorias VIII Congreso Nacional y III Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón, Colombia (2009).

Huertas, J.I., S. Izquierdo y E. González, *Modelación de la Dispersión de PM₁₀ y PST en la región minera del Departamento del Cesar, Colombia usando ISC y AERMOD*. Memorias VIII Congreso Nacional y III Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón, Colombia (2009).

Huertas, J.I., D. Camacho, *Metodología unificada de inventarios de emisiones para áreas de explotación de carbón a cielo abierto*. Memorias VIII Congreso Nacional y III Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón, Colombia (2009).

IEA, International Energy Agency, *Key World Energy Statistics* (2010).

Jones, T., y otros cinco autores, *Characterisation of airborne particles collected within and proximal to an opencast coalmine: South Wales, U.K.* Environmental Monitoring and Assessment 75, 293-312 (2002).

Jones, T., T. Moreno, K. BéruBé y R. Richards, *The physicochemical characterisation of microscopic airborne particles in South Wales: A review of the locations and methodologies*. Science of the Total Environment, 360, 43-59 (2006).

Muleski, G.E., *Surface Coal Mine Emission Factor Field Study, EPA-454/R-95-010, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, January (1994)*.

Muleski, G.E., *Update of AP-42 Emission Factors for Western Surface Coal Mines and Related Sections, Summary Report, Prepared for Emission Factors and Inventory Group (MD-14), Emissions, Modeling and Analysis Division, Office of Air Quality, Planning, and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711*.

Onder, M. y Yigit, E., *Assessment of respirable dust exposures in an opencast coal mine*. Environmental Monitoring Assessment, DOI 10.1007/s10661-008-0324-4 (2008).

Organización Mundial de la Salud, *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra (2006).

Pandey, S.K., B.D. Tripathi, V.K. Mishra, *Dust deposition in a sub-tropical opencast coalmine area, India*. Journal of Environmental Management, 86, 132-138 (2008).

Petavratzi, E., S. Kingman, I. Lowndes, *Particulates from mining operations: A review of sources, effects and regulations*. Minerals Engineering, 18, 1183-1199 (2005).

Pless-Mulloli, T., A. King, D. Howel, I. Stone, J. Merefield, *PM₁₀ levels in communities close to and away from opencast coal mining sites in Northeast England*. Atmospheric Environment 34, 3091-3101 (2000).

Shearer, D.L., *Coal Mining Emission Factor Development And Modeling Study, Amax Coal Company, Carter Mining Company, Sunoco Energy Development Company, Mobil Oil Corporation, and Atlantic Richfield Company, Denver, CO, July (1981)*.

Thompson R. J., A. T. Visser, *Mine Haul Road Fugitive Dust Emission and Exposure Characterisation*. University of Pretoria (2001).

Viana, M., X. Querol, A. Alastuey, J.I. Gil, M. Menéndez, *Identification of PM sources by principal component analysis (PCA) coupled with wind direction data*. Chemosphere, 65, 2411-2418 (2006).

Yuanzhi, C., N. Shah, F.E. Huggins, G.P. Huffman, *Microanalysis of ambient particles from Lexington, KY, by electron microscopy*. Atmospheric Environment, 40, 651-663 (2006).