

PROBLEMÁTICA DEL MATERIAL PARTICULADO EN LAS MINAS DE  
CARBON A CIELO ABIERTO EN COLOMBIA

NOMBRE:  
JESUS LEONARDO GARCIA FERNANDEZ  
C.C: 1120741886

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
COLOMBIA  
2015

PROBLEMÁTICA DEL MATERIAL PARTICULADO EN LAS MINAS DE  
CARBON A CIELO ABIERTO EN COLOMBIA

NOMBRE:  
JESUS LEONARDO GARCIA FERNANDEZ  
C.C: 1120741886

TUTOR:  
SANDRA MILENA CASTRO ESCOBAR

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
COLOMBIA  
2015

## Contenido

GENERALIDADES DEL TEMA.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
1. LOS EFECTOS EN LA SALUD DE LA MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO.....	6
2. LA CALIDAD DEL AIRE.....	19
2.1 METODOLOGÍAS PARA LA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE.....	21
3. DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO.....	25
3.1 EQUIPOS PARA MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO.....	26
3.2 MEDICIÓN PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN MENORES DE 10 MM (PM10).....	28
3.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSIÓN.....	28
3.4 MODELOS RECOMENDADOS POR LA US-EPA.....	30
3.5 TECNOLOGÍAS DE CONTROL PARA EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO.....	31
4. CRITERIOS AMBIENTALES DE MANEJO.....	33
5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y CONTROL.....	38
CONCLUSIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

## GENERALIDADES DEL TEMA

El tema de para la investigación de la monografía es todo lo relacionado con el material particulado de la mina de carbón a cielo abierto. Este tema es de gran importancia mirarlo desde la seguridad industrial qué medidas se han tomado para mitigar esta problemática que afecta a los trabajadores de la mina como los habitantes que se encuentra cerca de ella.

Para ello se realiza una investigación bibliográfica acerca del tema en cual se expone acerca de los efectos nocivos que produce el material particulado en las personas que exponen a ello, desde que instrumentos miden la calidad del aire que esta alrededor de la mina, los métodos que utilizan para la dispersión del material particulado en las minas de carbón de cielo abierto y las medidas que de control que se han tomado para ello.

De acuerdo con lo que queremos exponer en la monografía se consultaron investigación y trabajos que se han hecho acerca de este tema que afecta la salud de las personas no solo de las que laboran en la mina sino también de los habitantes que están a su alrededor.

Según datos investigados se establece que el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia ha venido haciendo esfuerzos para mejorar los mecanismos de prevención y control de la calidad del aire sobre las diferentes industrias y actividades involucradas en la emisión de material particulado a la atmósfera. Por esta razón ha desarrollado políticas que brindan los lineamientos y recomendaciones necesarios para realizar procesos de modelación de la calidad del aire y que permiten evaluar todas las fuentes fijas y móviles de contaminación atmosférica en el país. Es entonces que se plantea como objetivo principal determinar los efectos de la problemática de material particulado en Colombia

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es una problemática a la que cada vez se le atribuyen más efectos sobre la salud y el medio ambiente; por esta razón surge la necesidad de estudiar el comportamiento de las partículas desde el momento en que salen de la fuente de emisión, y su recorrido en la atmósfera, principalmente sobre grandes entornos geográficos donde la contaminación afecta directa o indirectamente una población.

Se define material particulado como una compleja mezcla de partículas suspendidas en el aire que varían en tamaño y composición dependiendo de sus fuentes de emisiones. Los modelos de calidad del aire y específicamente los modelos de dispersión, son herramientas que permiten evaluar la contribución de una determinada fuente de emisión a cualquier punto receptor, de esta forma, se pueden definir e implementar estrategias apropiadas de control de emisiones.

Los modelos de dispersión atmosférica de contaminantes, para el caso específico del material particulado, se basan en la descripción matemática de los procesos atmosféricos, en los que los efectos como la concentración de contaminantes se generan por causas como la evolución de las partículas en el aire, la dinámica de la atmósfera y las fuentes de emisión. Para representar de forma adecuada estos fenómenos se necesita de la solución de diferentes sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, lo que implica un problema matemático complejo.

Dado que de manera paralela a la explotación del carbón se generan considerables emisiones de material particulado que afectan a las personas que se encuentran al interior de los frentes de explotación, a las comunidades que habitan en el área de influencia de las minas carboníferas y a la fauna y flora de los ecosistemas intervenidos por las prácticas mineras, es por ello que se desea investigar los efectos que causa el material particulado y qué medidas se han tomado para control este fenómeno.

## 1. LOS EFECTOS EN LA SALUD DE LA MINERÍA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO.

La minería del carbón es una de las fuentes de energía que produce mayor contaminación durante cada una de las etapas de producción como lo es en la extracción, transporte y almacenamiento y durante su consumo. Por lo anterior, independiente de las implicaciones económicas involucradas con esta actividad, es claro que existe suficiente evidencia de los impactos derivados de la misma y cada año aparecen nuevas perspectivas de abordaje de la situación. No obstante, siempre el punto de mayor preocupación en este sector es la generación de partículas, las cuales, luego de un período considerable de tiempo de exposición por inhalación, bien sea por mineros o personas que habitan en los alrededores de las minas, puede eventualmente desembocar en diversidad de patologías pulmonares, en particular la neumoconiosis enfermedad inflamatoria de los pulmones que puede conducir a una pérdida total de la función pulmonar.<sup>1</sup>

Durante la extracción y transporte de carbón se genera una diversidad de material particulado, cuya toxicidad depende del tamaño de las mismas, y de varios factores, tales como su naturaleza química, presencia de metales/metaloideos traza, entre los cuales son comunes el plomo, cadmio, níquel, mercurio y arsénico entre otros. Las partículas de carbón, dependiendo del tamaño, tienen la capacidad de suspenderse en el aire, y en ocasiones dispersarse en el ambiente, recorriendo grandes distancias. En ese proceso, las mismas pueden ser inhaladas por los humanos, generando problemas respiratorios que usualmente varían con el tiempo de exposición. Aunque el sistema respiratorio posee mecanismos para remover estas partículas, en especial aquellas que se localizan en las vías respiratorias superiores, las depositadas en los pequeños alveolos pulmonares son mucho más difíciles de eliminar, y es allí en donde inician una serie de interacciones con las células presentes, lo que se traduce en procesos <sup>2</sup>

Para efectos normativos, las partículas respirables, en general, pueden clasificarse de acuerdo con el tamaño. En la legislación Colombiana, por ejemplo, partículas con un diámetro medio de 0.5-10 micrómetros, conocidas como MP10 o PM10, son las que poseen regulaciones en cuanto a la protección de la salud humana. Partículas más pequeñas, las de diámetro igual o menor a 2.5 micrómetros (MP2.5 o PM2.5), pueden penetrar aún mucho más en el tejido pulmonar, pero sobre ellas aún falta legislación en Colombia. No

---

<sup>1</sup> Attfield MD. 2011. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. Boletín de inteligencia actual 64: carbón la exposición al polvo de minas y los resultados de salud asociados - una revisión de la información publicado desde 1995. DHHS (NIOSH), 172, Disponible en <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-172>

<sup>2</sup> Castranova V, Vallyathan V. 2000. La silicosis y neumoconiosis de los trabajadores del carbón. Salud. 108: 675-684.

existe excusa alguna para no tenerla en la actualidad. En ambos casos, mediante diversos mecanismos, en los pulmones estas partículas generan especies reactivas de oxígeno, las cuales en exceso producen una condición conocida como estrés oxidativo. En conjunto con la liberación de citoquinas pro-inflamatorias, el estrés oxidativo resultante de la presencia de las partículas de carbón induce la generación de fibroblastos, células que pueden conducir al desarrollo de fibrosis del tejido pulmonar, y en algunos casos, si existe transformación celular, promoviendo la formación de cáncer

Los efectos derivados de la presencia de este material particulado, comúnmente denominado polvillo de carbón, en los pulmones se traducen en una enfermedad denominada neumoconiosis, la cual puede avanzar a una forma más grave de la misma denominada fibrosis masiva progresiva. En esta última la función pulmonar se ve comprometida debido a la extensa cicatrización y enfisema. Una vez los pulmones están comprometidos con fibrosis, son más susceptibles de adquirir enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) en sus formas comunes denominadas bronquitis crónica y enfisema<sup>3</sup>

Por otra parte, varias investigaciones han sugerido una probable asociación entre la producción de carbón y la alta prevalencia e incremento de la mortalidad por enfermedades cardiopulmonares, cáncer y enfermedades renales, en habitantes de las cercanías a las minas de carbón

Los factores más importantes para la absorción en el sistema respiratorio de los contaminantes presentes en partículas son su tamaño y solubilidad en agua. El diseño de las vías respiratorias favorece la deposición de partículas en sus paredes. El punto donde se depositan las distintas partículas está determinado fundamentalmente por su tamaño. La zona nasofaríngea retiene las partículas de tamaño superior a 10  $\mu\text{m}$ , que se depositan en las distintas zonas ciliada y no ciliada, de la mucosa nasal. Las partículas retenidas en la zona ciliada de la mucosa nasal están sometidas al batido rítmico de los cilios, de forma que alcanzan la faringe en un corto intervalo de tiempo, pasando así al sistema digestivo. Las partículas depositadas en la zona no ciliada de la mucosa nasal permanecen en el lugar de deposición hasta que se eliminan hacia el exterior mediante el estornudo o la limpieza del primer tramo de las fosas nasales<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Flores C, M Solís, Fortt A, Valdivia G. 2010. Asociación entre la contaminación interior, respiratorio síntomas y la EPOC en Santiago, Chile: estudio PLATINO. Rev Chil Enferm Respir. 26: 72-80.

<sup>4</sup> Moreno, M., 2003. Toxicología Ambiental: Evaluación del riesgo para la salud humana. McGrawHill.

Las partículas de tamaño inferior a 10  $\mu\text{m}$  penetran en los pulmones. Las de tamaño comprendido en el intervalo 2,5 – 10  $\mu\text{m}$  se depositan en la tráquea, bronquios y bronquiolos (Figura 4), viéndose sometidas de inmediato la aclaración mucociliar hacia la faringe y el sistema digestivo. Partículas de tamaño inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  son capaces de llegar al interior de los alvéolos pulmonares, donde las más hidrosolubles se disuelven y los menos se depositan. La eliminación o absorción subsiguiente de estas partículas tiene lugar por fagocitosis o por drenaje hacia el sistema linfático. En el primer caso, los macrófagos pulmonares fagocitan la partícula y pasan al torrente sanguíneo. En el segundo, las partículas penetran los capilares linfáticos, muy permeables a los que pueden acceder partículas y moléculas de peso molecular hasta 10.000 unidades

El sistema respiratorio puede ser dañado directamente por material particulado que entra al sistema sanguíneo o linfático a través de los pulmones. Además, los componentes solubles del material particulado pueden ser transportados a órganos distantes y causar efectos nocivos sobre éstos.<sup>5</sup>

Una fuerte correlación ha sido encontrada entre el incremento de la tasa de mortalidad y episodios agudos de contaminación atmosférica. En tales casos, altos niveles de material particulado son acompañados por elevadas concentraciones de  $\text{SO}_2$  y otros contaminantes. Una posible explicación para este efecto es que el  $\text{SO}_2$  llega a ser absorbido sobre la superficie de muy pequeñas partículas y es transportado por las partículas dentro del pulmón. Usualmente, diferentes contaminantes están presentes al tiempo, y, como resultado, los efectos ocurren debido a la acción de más de un contaminante

Generalmente, se asocian enfermedades del sistema respiratorio con la contaminación atmosférica. Hay dos tipos de reacciones a los contaminantes del aire por el sistema respiratorio. La primera es reacción aguda, tal como la bronquitis irritable y la segunda, las reacciones crónicas, tal como bronquitis crónica y enfisema pulmonar. A continuación una definición sucinta de éstas.

**Bronquitis.** Se refiere a la condición de inflamación del árbol bronquial

**Bronquitis crónica.** Es una inflamación sostenida del sistema bronquial, generando incremento en el volumen de secreciones de mucosidad bronquial suficiente para causar la expectoración.

---

<sup>5</sup> Manahan, S. Fundamentals of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publishers. 1993.



Enfisema. Condición en la cual el alveolo en el pulmón llega a ser desigual y sobre distorsionado debido a la destrucción de las paredes alveolares. La destrucción del alveolo es progresiva, resultando en incremento del flujo sanguíneo necesario para lograr transferir el oxígeno y una disminución en la habilidad para eliminar compuestos externos lo cual satura la región alveolar

Casos de muerte por enfermedades respiratorias potencialmente relacionadas con la contaminación del aire (2010-2011)

Departamento	Cáncer de tráquea, bronquios o pulmón	Cáncer de otros sitios	Neumonía	Crónicas de las vías respiratorias	Pulmonares por agentes externos
Amazonas	3	0	12	3	0
Antioquia	996	15	1.008	1.997	59
Arauca	18	1	31	43	4
Atlántico	183	3	393	355	8
Bogotá	491	28	944	1.831	107
Bolívar	134	6	256	226	22
Boyacá	69	5	192	529	21
Caldas	145	7	164	372	12
Caquetá	36	1	46	83	1
Casanare	7	2	22	47	1
Cauca	54	1	124	150	12
Cesar	83	3	109	206	5
Chocó	20	0	38	37	1
Córdoba	74	4	131	203	3
Cundinamarca	124	14	380	779	45
Guainía	1	0	7	5	0
Guaviare	5	0	5	11	1
Huila	58	5	136	280	15
La Guajira	24	1	66	48	2
Magdalena	104	1	139	196	3
Meta	69	4	109	202	16
Nariño	69	4	172	314	12
Norte de Santander	127	2	196	341	14
Putumayo	11	0	40	44	1
Quindío	86	1	127	292	4
Risaralda	130	5	160	375	8

Fuente: [DANE] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas en Colombia. Encuesta Nacional de Calidad de Vida

San Andrés y Providencia	4	0	5	12	0
Santander	184	12	339	519	33
Sucre	50	1	80	141	3
Tolima	123	5	232	445	25
Valle del Cauca	486	13	740	1.061	72
Vaupés	1	0	5	3	0
Vichada	1	0	6	0	0

Fuente: [DANE] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas en Colombia. Encuesta Nacional de Calidad de Vida

Casos de muerte por enfermedades cardiovasculares potencialmente relacionadas con la contaminación del aire

Departamento	Enfermedades isquémicas del corazón			Enfermedades cerebrovasculares		
	Total	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres
Amazonas	9	7	2	9	5	4
Antioquia	4.412	2.383	2.029	1.711	752	959
Arauca	114	73	41	72	32	40
Atlántico	1.301	703	598	636	303	333
Bogotá	3.811	2.065	1.746	1.916	782	1.134
Bolívar	701	395	306	465	217	248
Boyacá	945	519	426	507	255	252
Caldas	1.140	644	496	378	178	200
Caquetá	196	115	81	95	42	53
Casanare	125	86	39	61	28	33
Cauca	673	367	306	362	166	196
Cesar	415	244	171	194	94	100
Chocó	111	56	55	110	52	58
Córdoba	708	435	273	434	221	213
Cundinamarca	1.976	1.104	872	691	319	372
Guainía	5	3	2	8	4	4
Guaviare	30	22	8	17	11	6
Huila	743	385	358	305	154	151
La Guajira	202	108	94	84	29	55
Magdalena	636	355	281	327	138	189
Meta	553	336	217	246	132	114
Nariño	695	344	351	455	209	246
Norte de Santander	886	485	401	449	211	238

Fuente: DANE.

Putumayo	64	33	31	58	34	24
Quindío	577	318	259	188	94	94
Risaralda	938	532	406	381	165	216
San Andrés y Providencia	23	8	15	18	3	15
Santander	1.610	887	723	714	354	360
Sucre	486	262	224	288	133	155
Tolima	1.801	990	811	535	241	294
Valle del Cauca	3.243	1.845	1.398	1.828	820	1.008
Vaupés	3	1	2	6	4	2
Vichada	16	9	7	6	2	4

Fuente: DANE

## **ESTUDIO SOBRE EL MATERIAL PARTICULADO EN LAS MINAS DE COLOMBIA**

Según investigaciones recientes sobre la problemática del material particulado se dice que 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. 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).

Cabe resaltar que entre los países latinoamericanos, Colombia se encuentra a la vanguardia con una producción de 73 Mton anuales. 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.

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. 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. En contraste, las fuentes fugitivas son abiertas, tales como los suelos y las pilas de carbón expuestos a la erosión del viento

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, epídota, biotita y piroxenos y en menor cantidad muscovitas, cloritas, calcitas y fragmentos orgánicos.<sup>6</sup>

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.

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.<sup>7</sup>

---

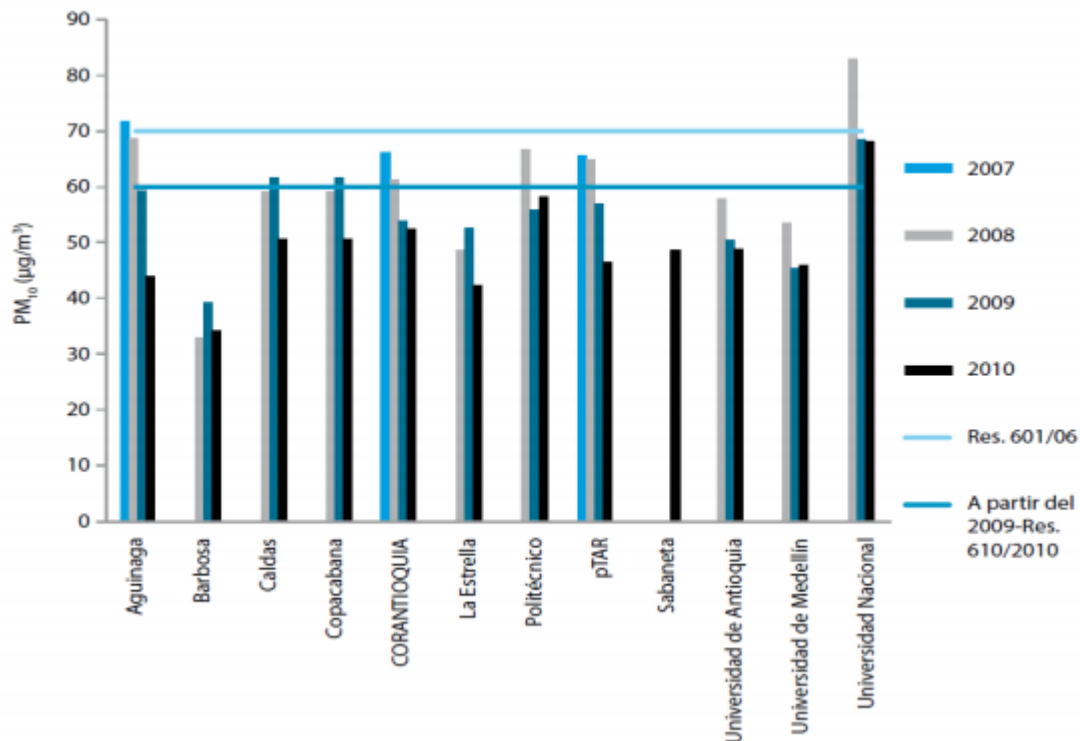
<sup>6</sup> Huertas, J.I. y E. Vilchis, Dispersión y deposición de material particulado en zonas de explotación minera a cielo abierto usando CFD. Memorias VIII Congreso Nacional y III Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón, Colombia (2009)

<sup>7</sup> Huertas, J.I., S. Izquierdo y E. González, Modelación de la Dispersión de PM 10y 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).

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).

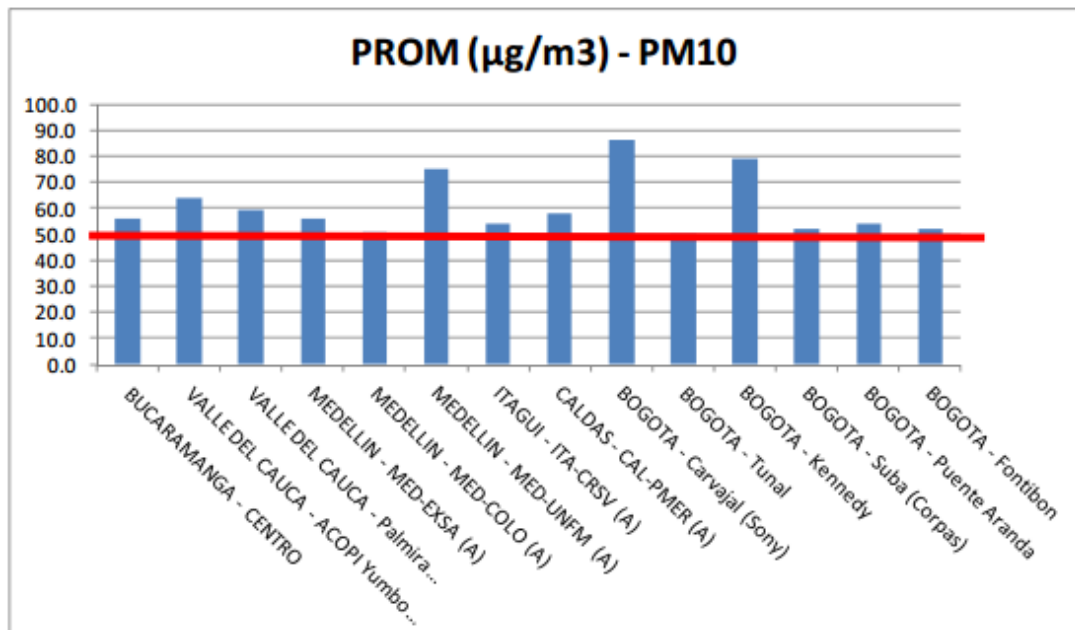
Con el propósito de cuantificar la concentración de MP dentro y fuera de las minas, se han puesto en operación redes de monitoreo de calidad del aire. Así como también, se han usado diferentes modelos de calidad del aire. Existe la oportunidad de aplicar los modelos de receptor para determinar los aportes 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.

#### Concentración promedio Anual de PM10



Fuente: [IDEAM] Instituto de Higrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007 – 2010.

Media anual de PM10 a Diciembre de 2012 en ciudades de Colombia.



Fuente: DANE

## EVOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA EN COLOMBIA

Colombia es reconocido internacionalmente desde hace 30 años como uno de los principales productores de carbón del continente, con mayores reservas de carbón en América Latina, cuenta con recursos potenciales de 16.992 Millones de toneladas (Mt) de los cuales 7.063 Mt son medidas, 4.571 Mt son indicadas, 4.237 Mt son inferidas y 1.119 Mt son recursos hipotéticos, por otra parte, es el sexto exportador de carbón del mundo, con una participación de 6,3%, equivalente a 50 Mt anuales de carbón, se espera que las cifras de exportación continúen aumentando en la década siguiente. Colombia es reconocida también por sus reservas de oro, cobre, níquel y otros minerales, que hacen del país una potencia minera estable a nivel mundial. La explotación de otros minerales, tales como el oro, hierro y níquel, también está en aumento, lo cual lo ha convertido en un país atractivo para la inversión minera, gracias a su dinámica en la economía y a su potencial en explotación y reservas de los recursos naturales, además de participar activamente en el proceso de globalización, con la firma de tratados de libre comercio.

En Colombia existe una conciencia actual y creciente relacionada con la problemática y degradación ambiental que genera la contaminación atmosférica; preocupación que ha tomado fuerza en los últimos años debido al incremento de los efectos que se han causado a la salud de las personas y al

medio ambiente, razón por la cual se han establecido medidas a nivel normativo, institucional y operativo, cuyo principal resultado ha sido que en los años 2006 y 2010 se realizara la actualización de las normas de calidad del aire, ruido, fuentes fijas, fuentes móviles y combustibles.<sup>8</sup>

Como la minería es uno de los sectores clave del actual plan de desarrollo de Colombia, el compromiso de las autoridades ambientales es ejercer un debido control ambiental y social de tal manera que este sector sea ambientalmente responsable. Desde la perspectiva de la calidad del aire, en un proyecto de explotación de minerales a cielo abierto, se generan emisiones atmosféricas y ruido por la maquinaria y equipos asociados al proyecto, dichas emisiones al aire ambiente ocurren durante todas las etapas del ciclo de vida de una mina, si bien en particular se dan durante la exploración, desarrollo, construcción y operación

La minería a gran escala potencialmente puede contribuir de manera importante a la contaminación del aire, especialmente durante la etapa de operación. Las actividades durante la extracción de mineral, procesamiento, manipulación y transporte dependen del equipo, del tipo de generadores de energía, procesos y materiales que pueden generar contaminantes atmosféricos peligrosos tales como material particulado, metales pesados, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno.

Las mayores fuentes de contaminación del aire en operaciones mineras corresponden a: i) Material particulado transportado por el viento como resultado de perturbaciones mecánicas de los materiales rocosos y el suelo, tales como excavaciones, voladura y trituración, el transporte de los materiales (acarreo del mineral y el material estéril, que pueden aportar casi el 70% de las emisiones totales, cargue y descargue de los materiales y la erosión por el viento que sopla sobre las áreas de suelo descubiertas(sin cobertura vegetal), depósitos, pilas de desechos y vías internas despavimentadas, material particulado proveniente de los gases de escape de fuentes móviles (vehículos, camiones, maquinaria pesada); y ii) Emisiones gaseosas provenientes de la quema de combustibles en fuentes estacionarias como móviles, voladuras y procesamiento de minerales.

De los anteriores, el mayor impacto potencial de la actividad minera a cielo abierto es la emisión de polvo (material particulado) desde las superficies de trabajo, durante el proceso de explotación del yacimiento, el cual puede

---

<sup>8</sup> Alianza Mundial de Derecho Ambiental, E. (Julio de 2010). Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros. Obtenido de <http://www.elaw.org/files/mining-eiaguidebook/Guia%20%20para%20Evaluar%20EIAs%20de%20Proyectos%20Mineros.pdf>

constituirse en un riesgo potencial para el ambiente y las comunidades cercanas

## **CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM10 y PM 2.5)**

El aire es un recurso natural que, así como sucede con muchos otros, recibe el embate de la contaminación generada por el hombre y también una aportación de la misma naturaleza. Esto quiere decir que además del hombre, también la naturaleza contribuye a que tengamos un aire con cierto nivel de contaminantes.

Importante resulta aclarar que la responsabilidad de los problemas actuales de contaminación atmosférica no está equitativamente distribuida entre los referidos generadores ya que la concentración poblacional en las ciudades es causa de múltiples problemas evidentes en este vital elemento.

El aire en la atmósfera está compuesto natural y originalmente por diversos gases entre los cuales el nitrógeno (78%) es el predominante, siguiéndole el oxígeno (21%) y completándose con cantidades sumamente reducidas de otros gases tales como argón (0.9%), dióxido de carbono (0.03%) y otros. Además de estos gases, de manera natural, el aire también contiene diversas partículas características propias del sitio en que se encuentre un ambiente determinado y de la época anual.

En el entorno de las ciudades y asentamientos humanos el aire atmosférico registra aportes de sustancias generadas por las actividades predominantes. Así se tendrán atmósferas cargadas de aromas, de colores, sabores totalmente vinculados con las materias primas, procesos y productos manejados en un sitio particular. Hay elementos que pueden estar presentes frente a los cuales los sentidos humanos no pueden ayudar a su identificación. Ciertos elementos en el aire tienen una influencia nociva, en estos casos su identidad, análisis y medición se vuelve un factor importante para la salud.

Para efectos del análisis y medición de las partículas en el aire atmosférico se conocen como partículas finas o, más frecuentemente, como material particulado (particulate matter en inglés), de ahí que refiriéndose a las partículas menores a 10 micrómetros se use la nomenclatura PM10 y para hacer alusión a las que son menores a 2.5 micrómetros se use PM2.5.



Las partículas o material particulado, puede llegar a ser un elemento importante como factor contaminante en la atmósfera de una ciudad, una zona o sitio, pueden estar depositadas sobre el suelo aunque generalmente flotan en el aire. El hecho de flotar en el aire se favorece principalmente debido a su tamaño ya que son muy pequeñas tanto que para hablar de su medida se utiliza el término micrómetro o micra, unidad de longitud equivalente a la millonésima parte de un metro. Estas dimensiones las hacen ser sumamente ligeras, aspecto que se combina con su forma y con diversos factores de tipo climático entre los cuales está la temperatura del ambiente y los vientos.

El material particulado es un problema de contaminación caracterizado por su movilidad. Cuando no hay viento, las partículas pueden permanecer en el aire durante minutos u horas, en cambio, mientras haya viento constante podrían mantenerse durante de días o semanas viajando por diversos territorios dejando rastros de su presencia en diversos sitios distintos a donde fueron originalmente generadas. Esta cualidad de permanencia en suspensión en el aire ha propiciado que el material particulado o partículas también sea conocido como partículas suspendidas.

El aspecto del tamaño de las partículas es de sumo interés para entender su movilidad y sus perjuicios a la salud. La clasificación en base al tamaño se ha dividido en dos grupos principales: las grandes, o fracción gruesa, señaladas como PM10 cuyo tamaño está entre los 2.5 -10 micrómetros; y las pequeñas, fracción fina, PM2.5 menores a los 2.5 micrómetros.

Al inhalar se introduce aire a los pulmones, si en el aire hay partículas éstas entrarán directamente al sistema respiratorio a pesar de que el cuerpo humano cuenta con diversos mecanismos de protección natural a largo del sistema respiratorio. Un ambiente contaminado va minando paulatinamente estas defensas, sobretodo es de considerar que en promedio un adulto inhala entre 10,000 y 12,000 litros de aire.

Ya en el interior del cuerpo, las partículas se adhieren a las paredes de las vías respiratorias y algunas llegan a alojarse en el interior de las paredes de los pulmones. Mientras mayor sea la penetración de las partículas en el aparato respiratorio, tanto en el aspecto cuantitativo como cualitativo, los perjuicios serán mayores debido a que el organismo carece de suficientes mecanismos de eliminación de estos contaminantes, sobre todo cuando la permanencia en ambientes contaminados es constante. En base a lo anterior, las enfermedades de tipo respiratorio se incrementan notablemente en la población expuesta de manera persistente a la presencia de este factor contaminante.

Las PM o material particulado, forma parte de los denominados contaminantes criterio que son los considerados como de mayor impacto en la salud humana, por lo cual, se ha generado una normatividad donde se marcan límites permisibles de concentración en un período de tiempo buscando reducir sus efectos nocivos.

Para la prevención de los efectos nocivos sobre la salud humana se emitieron una serie de normas para cada uno de los contaminantes criterios. En el caso del material particulado se emitió la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-1993. En la norma de referencia se establecen claramente los valores límite normado para los contaminantes.<sup>9</sup>

El efecto de las partículas en la salud depende de su composición química, pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares. En el corto plazo la contaminación por PM10 puede causar el deterioro de la función respiratoria. En el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, con el cáncer o con la muerte prematura.

---

<sup>9</sup> García Lozada Héctor Manuel, EVALUACIÓN DEL RIESGO POR EMISIONES DE PARTÍCULAS EN FUENTES ESTACIONARIAS DE COMBUSTIÓN; ESTUDIO DE CASO: BOGOTÁ

## 2. LA CALIDAD DEL AIRE

Es algo esencial que se debe velar en la seguridad industrial de un trabajador que está expuesto al material particulado que se genera en las minas de carbón por lo tanto la calidad del aire en cualquier operación minera a cielo abierto es uno de los mayores desafíos ambientales. Es entonces que algunos se han preocupado por esta problemática como un reto que requiere de una permanente evolución y mejoramiento continuo. Por este motivo es que se ha querido que en las minas se implemente diferentes acciones enmarcadas no solo en la prevención, el control y la mitigación de generación de material particulado y mantener la calidad del aire en valores que permitan proteger la salud de las comunidades vecinas, sino también en la medición y el pronóstico que dan luces sobre la efectividad de las medidas y la posibilidad de mejoras.

Por lo tanto en la prevención de la generación de material particulado en las operaciones mineras hace pensar que es necesario poner en marcha medidas como el control de la velocidad de los vehículos y equipos de carga en las áreas de tránsito y la revegetalización de áreas expuestas al viento. Las vías y patios de almacenamiento se humectan constantemente mediante la aspersión con tanqueros de hasta 22000 galones, y se ejecuta un plan de riego mensual de acuerdo con las vías activas existentes y el tráfico de maquinaria en cada una de ellas.

Las operaciones mineras a cielo abierto generan material particulado (polvo), el cual si no es correctamente controlado puede constituirse en un riesgo significativo tanto para las comunidades vecinas como para el ambiente. Es por eso que en las minas del país se deben desarrollar un sistema de gestión de calidad del aire con el que se evalúan sus condiciones actuales, se planea e implementan las medidas de prevención y mitigación requeridas y se le hace seguimiento y monitoreo a la eficiencia de las mismas. Con este sistema de gestión en las minas de carbón de cielo abierto se hace necesario para la protección del ambiente y de la salud de los trabajadores y de las comunidades que rodean la mina, así como con el cumplimiento de las normas establecidas por las autoridades ambientales del país.

Algunas de las acciones que se pueden desarrollar para controlar las emisiones de polvo dentro de las operaciones mineras son:

Uso de modelos de dispersión atmosférica como herramienta de planeación y definición de la secuencia minera.

Riego de las vías de acarreo de materiales con una flota de 26 tanqueros de 20 mil galones de capacidad cada uno. El agua utilizada, proveniente de lluvias o lagunas de retención, se mezcla con químicos supresores de polvo para obtener mejores resultados.

Humectación y adición de agua durante las operaciones de cargue de roca, carbón y suelo.

Utilización de aspersores para riego de las áreas de avance minero en los niveles superiores de los tajos.

Humectación y compactación del carbón en los vagones, durante su transporte

Cubrimiento de las bandas transportadoras del carbón

Conformación de cuadrillas para el control de la combustión espontánea de los mantos de carbón.

Monitoreos bianuales de presencia de gases (óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono) en la operación. Los resultados indican que las concentraciones son muy bajas.

Red de monitoreo de calidad de aire para polvo suspendido total, respirable y sedimentable

Tres estaciones automáticas de muestreo en tiempo real como herramienta de alerta temprana a la operación para establecer oportunamente las acciones de control que correspondan.

Estándares de calidad del aire en Colombia

Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible	Tiempo de Exposición
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 horas
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	50	Anual
		100	24 horas
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	25	Anual
		50	24 horas

Fuente: Resolución 610 de marzo del 2010. MADS

## 2.1 METODOLOGÍAS PARA LA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

Para determinar la calidad del aire existen unos modelos que determinan la calidad del aire en la cual se utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes en su dispersión y transformación en la atmósfera. Para describir la dispersión de contaminantes atmosféricos alrededor de una fuente de emisión es necesario involucrar en la modelación los siguientes fenómenos físicos que ocurren en forma simultánea:

- ✓ El movimiento de fluidos gaseosos de varias especies y de partículas suspendidas, de densidad variable y en régimen turbulento.
- ✓ La transferencia de calor que ocurre al interior del fluido.
- ✓ La transferencia de masa que ocurre a la salida de la fuente, en la atmósfera y en los receptores.
- ✓ Los procesos de formación y destrucción de especies que ocurren al interior del fluido.
- ✓ Las reacciones químicas que ocurren al interior del fluido bajo la presencia de factores externos como radiación solar y humedad.
- ✓ Se debe incluir como parámetros de entrada las siguientes condiciones:
  - ✓ Meteorología del lugar.
  - ✓ La emisión másica de cada especie.
  - ✓ La geografía del lugar y el uso del suelo.

### MODELOS FOTOQUÍMICOS

Los modelos fotoquímicos es una aplicación que se refiere a la modelación de la calidad del aire en las regiones en las cuales se encuentran las minas de carbón con múltiples fuentes de emisión (>100). Se caracteriza por combinar fuentes de emisión provenientes de fuentes móviles y de fuentes fijas de diferente naturaleza. Bajo esta circunstancia, se genera una atmósfera propicia para la formación de contaminantes secundarios tales como partículas inorgánicas y ozono (O<sub>3</sub>), los cuales son formados como producto de las interacciones físico químicas entre los diferentes contaminantes primarios.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> DANIEL FERNANDO PRATO SÁNCHEZ. Modelación de la dispersión de material particulado en zona minera del cesar, Colombia, usando fluent (cfd). UNIVERSIDAD EAN.2012

En estos casos se usan modelos fotoquímicos que incluyan mecanismos de formación y destrucción de contaminantes tales como deposición seca y húmeda de partículas, formación de partículas inorgánicas secundarias, reacciones fotooxidantes y escenarios químicos especializados.

Los modelos fotoquímicos de calidad del aire se han vuelto ampliamente conocidos y regularmente utilizados para analizar y demostrar la efectividad de las estrategias de control de la contaminación. Los modelos fotoquímicos son modelos de calidad del aire de gran escala, que simulan los cambios en la concentración en la atmósfera de contaminantes usando el conjunto de ecuaciones matemáticas que caracterizan los procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera. Estos modelos pueden ser aplicados a escala local, regional, y nacional.

Hay dos tipos de modelos foto químicos comúnmente usados: modelos de trayectoria lagrangianos que emplean un sistema de referencia en movimiento y modelos eulerianos. Sin embargo, la desventaja de esta aproximación es que los procesos físicos que se pueden describir son incompletos. Actualmente, la mayoría de los modelos foto químicos han adoptado el modelo euleriano de grilla principalmente por su habilidad de caracterizar los procesos físicos que ocurren en la atmósfera y de predecir correctamente las concentraciones de contaminantes a través de todo el dominio del modelo.

## **MODELOS ESTADÍSTICOS**

Los modelos estadísticos son los que buscan predecir la concentración de contaminantes atmosféricos a nivel superficie con base en el análisis estadístico de datos experimentales recolectados entre las variables que se establezcan para ello.

### **Redes neuronales**

Las redes neuronales son modelos matemáticos que buscan reproducir el comportamiento biológico cerebral. Cada neurona del sistema se caracteriza por tener entradas de activación  $x_j$ , las cuales son modificadas por un conjunto de conexiones denominadas pesos  $W_j$ . La neurona cuenta con un sumador que se encarga de sumar las entradas multiplicadas por su peso respectivo. Finalmente las señales resultantes entran a una función de activación no lineal que determina las salidas.

El concepto de redes neuronales ha sido implementado para predecir las concentraciones de contaminantes atmosféricos alrededor de fuentes de emisión como una función de las variables meteorológicas y del nivel de emisiones. Sin embargo estos modelos no han sido aceptados para propósitos regulatorios.

### **Modelos de Monte Carlo**

Los modelos de Monte Carlo reproducen la física de la formación de partículas y el transporte de las mismas mediante el uso de métodos probabilísticos con los cuales se determinan la velocidad de difusión y transporte de las partículas, mediante la manipulación de números aleatorios generados por un computador. Han sido implementados para predecir la evolución de aerosoles y su transporte a grandes distancias. Hasta la fecha estos modelos no han sido reconocidos como modelos preferidos para la modelación de la calidad del aire con propósitos regulatorios.

### **Modelos de receptores**

Los modelos de receptores son procedimientos matemáticos o estadísticos para identificar y cuantificar la fuente de procedencia de contaminantes atmosféricos en la ubicación de un receptor dado, A diferencia de los modelos fotoquímicos, los modelos de receptores no usan emisiones de contaminantes, datos meteorológicos ni transformaciones químicas para estimar las contribuciones de las diferentes fuentes en la concentración de contaminantes en un receptor dado. En cambio, los modelos de receptores usan las características físicas y químicas de los gases y partículas medidas en las distintas fuentes y en el receptor, para cuantificar la contribución de cada fuente a la concentración de contaminantes en el receptor. Estos modelos son por tanto un complemento natural a otros modelos de calidad del aire. Han sido usados con propósitos regulatorio. Normalmente son utilizados cuando se tiene información precaria de las condiciones meteorológicas o de las tasas de emisión de las fuentes. En este tipo de modelos solo es posible simular material particulado o gases formados directamente desde la fuente, es decir, que no hayan sufrido transformación química durante la trayectoria fuente-receptor.

## **MODELOS FÍSICOS Y EXPERIMENTALES**

Corresponde a modelos a escala montados en túnel de viento donde se reproducen físicamente las condiciones topográficas y meteorológicas presentes en la zona de monitoreo. El túnel de viento es una instalación experimental que permite controlar las diferentes variables presentes en la dispersión de contaminantes asociadas con las emisiones, meteorología y geográfica del área de estudio.

## **MODELOS GAUSSIANOS**

Los modelos gaussianos asumen que la concentración de contaminantes se distribuye normalmente en la dirección vertical y transversal en las ecuaciones que se planteen.

Por su simplicidad, históricamente los modelos gaussianos han sido los preferidos para realizar proceso de modelación de calidad del aire. Con el tiempo estos modelos han venido incorporando algoritmos que permiten tener en cuenta la complejidad del terreno, la variabilidad de la meteorología y las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera. Como resultado, actualmente se cuentan con modelos gaussianos más refinados que aunque son más exactos, son complejos de implementar y requieren de una gran cantidad de información como datos de entrada.



### 3. DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO

El material particulado es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados en el mundo, este se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas.

La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz. Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos.

Es necesario, además de realizar mediciones de la concentración de este contaminante, evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo, asociándolo con los fenómenos meteorológicos, composición química y origen, los cuales permitan orientar estrategias de control y realizar seguimiento por parte de las autoridades ambientales interesadas.

Por lo tanto el material particulado (MP) es un conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, tales como el hollín de diesel, polvo de vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos. Según la normatividad colombiana, el MP no sedimenta en períodos cortos sino que permanece suspendido en el aire debido a su tamaño y densidad. Estas partículas en suspensión (MP) son una compleja mezcla de productos químicos y/o elementos biológicos, como metales, sales, materiales carbonosos, orgánicos volátiles, compuestos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y endotoxinas que pueden interactuar entre sí formando otros compuestos.

Debido a que son de tamaño, forma y composición variada, para su identificación se han clasificado en términos de su diámetro aerodinámico que corresponde al diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento que la partícula de interés y que está determinado por la forma y densidad de la partícula. De acuerdo a esto, pueden ser clasificadas como finas y gruesas.

Estas partículas pueden variar su tamaño y composición a través de varios procesos como el vapor de condensación, la evaporación, la coagulación a través de las colisiones del movimiento browniano por la hidrodinámica y

fuerzas gravitacionales o eléctricas. El material particulado posee una amplia gama de propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas). Este es emitido a la atmósfera producto de diferentes actividades, tanto naturales como antropogénicas. Entre las actividades naturales se encuentran las emisiones volcánicas y las partículas arrastradas por el viento, como el aerosol marino. Dentro de las actividades antropogénicas se encuentran las emisiones de gases de escape y partículas procedentes de los buques de navegación marítima. Además, algunos investigadores han divulgado que la emisión de contaminantes de origen vehicular, constituye una de las causas más relevantes en el deterioro de la calidad del aire lo que afecta la composición química de la atmósfera a nivel local y regional. La extracción de la atmósfera del material particulado en suspensión se produce por diversos mecanismos, bien sea por deposición seca o por deposición húmeda, cuya eficacia depende esencialmente del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas. El material particulado está asociado con compuestos con conocida actividad genotóxica, mutagénica o carcinogénica.

Conocer la composición química del material particulado, tiene relevancia no solo desde el punto de vista de la química de la atmósfera, sino también sobre la calidad del aire que se respira. Muchas propiedades de las partículas pueden influir de manera importante en su comportamiento en el aire y sus efectos sobre el ambiente y la salud.

Los modelos de contaminación del aire juegan un papel importante en la ciencia, debido a su capacidad para investigar la importancia de procesos relevantes, al igual que un mayor rol en la aplicación. Son los únicos métodos que pueden cuantificar la relación entre emisiones y concentración-deposición, incluyendo las consecuencias de escenarios futuros y las estrategias de disminución. Estos modelos han sido usados para calcular el impacto de las emisiones volcánicas.

### **3.1 EQUIPOS PARA MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO**

Los equipos utilizados para la medición de material particulado, succionan una cantidad medible de aire ambiente hacia una caja de muestreo a través de un filtro, durante un periodo de tiempo conocido, generalmente 24 horas. El filtro es pesado antes y después para determinar el peso neto ganado. El volumen total de aire muestreado se determina a partir de la velocidad promedio de flujo y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas en el aire ambiente se calcula como la masa recolectada dividida por el volumen de aire muestreado, ajustado a las condiciones de referencia. Existen dos muestreadores de este tipo que se diferencian en su controlador de flujo, pueden ser de sistema MFC (controlador de flujo de tipo másico) o VFC (controlador de flujo de tipo volumétrico)

Otros equipos son instalados directamente sobre las personas, llamados también bombas de muestreo personal. La bomba personal permite realizar mediciones directas de partículas PM10, tomando muestras de aire para medir la concentración de partículas en suspensión (líquido o sólido), proporcionando una continua y directa lectura, así como el registro electrónico de la información.

Según García en las mediciones de partículas hay muchas causas de error, estas incluyen interferencias, niveles de blancos, reproducibilidad de los métodos de muestreo y muestreo estadístico. Cada medida tiene un grado de incertidumbre debido a los límites de medición de los equipos y las personas que usan estos equipos. Las principales fuentes de error son:

Contaminación artificial de las muestras en su manipulación.

Pérdida de material colectado durante el muestreo, recolección o almacenamiento de los filtros.

Inadecuado manejo de los filtros durante su transporte o almacenamiento.

Modificación de las muestras durante su análisis.

Errores en el manejo de los datos.

Medición de Partículas Suspendidas Totales (PST)

Para la medición de PST se instala un equipo localizado apropiadamente en el sitio de muestreo. Este equipo arrastra una cantidad de aire ambiente a una caja de muestreo a través de un filtro, durante un periodo de muestreo (nominal) de 24 horas. La velocidad de flujo de muestreo y la geometría de la caja, favorecen la recolección de partículas hasta de 25-50  $\mu\text{m}$  (diámetro aerodinámico), según sea la velocidad y dirección del viento. Los filtros usados deben tener una eficiencia mínima de recolección del 99% para partículas de 0,3  $\mu\text{m}$ .

El filtro se pesa (después de equilibrar la humedad) antes y después de usarlo, para determinar el peso (masa) neto ganado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones estándar (25°C, 760 mmHg), se determina a partir de la velocidad de flujo de medida y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas suspendidas en el aire ambiente se calcula como la masa de partículas recolectadas, dividida por el volumen de aire muestreado, corregida de acuerdo con las condiciones estándar y expresadas en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  estándar. Para muestras recolectadas a temperaturas y presiones significativamente diferentes a las condiciones estándar, estas concentraciones medidas pueden diferir sustancialmente de las concentraciones reales,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  real, especialmente en alturas elevadas. La concentración real de partículas puede calcularse a partir de la concentración medida, usando la temperatura real y la presión, durante el periodo de muestreo.

### **3.2 MEDICIÓN PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN MENORES DE 10 MM (PM10)**

Para la medición de las concentraciones de material particulado en suspensión, se pueden emplear equipos para la medición de partículas respirables o medidores de alto volumen PM10, como el presentado en la Figura 6. Estos equipos miden exclusivamente todo el material respirable establecido con tamaño de partícula menor que  $10\mu$ ; las partículas respirables, son aquellas que logran pasar el tracto respiratorio penetrando en los alvéolos pulmonares <sup>11</sup>

Estos equipos arrastran aire ambiente a una velocidad de flujo constante hacia una entrada de forma especial, donde el material particulado se separa por inercia en una o más fracciones, dentro del intervalo de tamaño de PM10. Cada fracción dentro del intervalo de tamaño de PM10 se recolecta en un filtro separado en un periodo de muestreo específico. Cada filtro se pesa (después de equilibrar la humedad), antes y después de usarlo, para determinar el peso neto (masa) ganado debido al PM10 colectado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia ( $25^{\circ}\text{C}$ ,  $101,3\text{ kPa}$ ), se determina a partir de la velocidad de flujo medida y el tiempo de muestreo. La concentración másica de PM10 en el aire ambiente, se calcula como la masa total de partículas recolectadas en el intervalo de tamaño de PM10 dividido por el volumen de aire muestreado y se expresa en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{ std}$ . Para muestras de PM10 recolectadas a temperaturas y presiones significativamente diferentes de las condiciones de referencia, las concentraciones corregidas algunas veces difieren sustancialmente de las concentraciones reales (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{ real}$ ), particularmente a grandes elevaciones. Aunque no es requerido, la concentración real de PM10 puede calcularse a partir de la concentración corregida, usando la temperatura ambiente y la presión barométrica promedio durante el periodo de muestreo.

### **3.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSIÓN**

La modelación se utiliza para saber, entre otras cosas, cómo cambia en el tiempo y el espacio la concentración o la razón de mezcla de una sustancia o traza habitualmente identificada como un contaminante criterio, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire y de esta forma colaborar en las decisiones políticas y de planificación respecto a la gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire. La concentración de la emisión en un punto cambia por convergencia o divergencia de vientos, porque la masa es advectada hacia o desde un punto en direcciones horizontales y/o verticales, por la presencia de flujos turbulentos

---

<sup>11</sup> Saldarriaga, J., Echeverri, C., y Molina, F. (2004). Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM10) en el Valle de Aburrá, Colombia. Revista Facultad de Ingeniería, 32, 7-16.

dados por la covariación de fluctuaciones de concentración y viento Desde 1970, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA) ha desarrollado una gran variedad de modelos de dispersión atmosféricos de diferente complejidad, usados con fines regulatorios.

Los modelos atmosféricos de la US-EPA están a la vanguardia del desarrollo científico y tecnológico, siendo estos ampliamente reconocidos y utilizados a nivel mundial. Estos modelos, están basados en formulaciones matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes del aire, ya que al dispersarse, reaccionan en la atmósfera. Basándose en los aportes de los datos meteorológicos y de información de la fuente, como las tasas de emisión y la altura de la pila. Estos modelos están diseñados para caracterizar los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera, y en algunos casos los contaminantes secundarios que se forman como resultado de complejas reacciones químicas dentro de la atmósfera.

Estos modelos son importantes para los sistemas de gestión de la calidad del aire, debido a que son ampliamente utilizados por las agencias encargadas de controlar la contaminación del aire, tanto para identificar las contribuciones de origen a problemas de calidad del aire, como para ayudar en el diseño de estrategias efectivas para reducir los contaminantes dañinos del aire. Por ejemplo, los modelos de calidad del aire se pueden utilizar durante el proceso de permisos para verificar que una nueva fuente no deberá exceder las normas de calidad del aire o, si es necesario, determinar los requisitos apropiados de control adicional. Además, los modelos de calidad del aire, también pueden ser utilizados para predecir las concentraciones futuras de contaminantes provenientes de múltiples fuentes después de la implementación de un programa regulador, con el fin de evaluar la efectividad del programa en la reducción de la exposición dañina a los seres humanos y el ambiente

Estos protocolos matemáticos tienen en cuenta además los parámetros de entrada:

Cantidad de contaminante emitida por unidad de tiempo.

Posición y altura de emisión.

Velocidad y dirección de los vientos dominantes.

Estabilidad atmosférica.

Altura de mezclado.

Comportamiento químico del contaminante (posibles reacciones, vida media).

## **Tipos de modelos matemáticos**

Los modelos matemáticos para el estudio de los contaminantes atmosféricos han sido desarrollados para estudiar el comportamiento de estos a partir de variadas fuentes, según la US-EPA estos modelos están clasificados de la siguiente manera:

Modelos de celda fija (vertimientos homogéneos): se utilizan para obtener estimaciones de concentración de contaminante para emisiones difusas, diseminadas a lo largo de una determinada superficie, como es el caso de una ciudad.

Modelos gaussianos de dispersión (vertimientos puntuales): son los que se utilizan para estimar la concentración de contaminante producida por una fuente puntual, por ejemplo, la chimenea de una fábrica o el escape de un depósito. El objetivo del modelo determina la concentración a cierta distancia de la fuente.

Modelos combinados (celda múltiple): son los que se utilizan en la práctica para estimar concentraciones de contaminante en regiones definidas. Dividen el volumen total del aire en pequeñas celdas en las que se almacenan, de manera numérica, las concentraciones de varios contaminantes. El modelo tiene en cuenta las reacciones químicas sufridas por los contaminantes (vidas medias, constantes de velocidad) así como los flujos de materia que pasan de una celda a sus vecinas.

En el contexto internacional, el modelo más usado para la modelación de calidad del aire es el ISCST3 basado en el Modelo de Dispersión de Gauss, propuesto como regulatorio por la Agencia de Protección del Medio Ambiente

### **3.4 MODELOS RECOMENDADOS POR LA US-EPA**

Existen diferentes herramientas desarrolladas por la US-EPA para la modelación del material particulado, dentro de los más conocidos se encuentra el Industrial Source Complex (ISC). A corto plazo, este modelo predice las concentraciones de contaminantes, a partir de casi cualquier tipo de fuente de emisión de contaminantes no reactivos. Además, permite definir las redes del receptor y considerar las características topográficas de cada lugar receptor. También, es capaz de introducir por encima de la altura a nivel del suelo para simular el impacto en la elevación o “asta” a los receptores.

Esta aplicación se utiliza para evaluar el impacto de las emisiones a la atmósfera de una variedad de fuentes industriales, prediciendo las concentraciones de contaminantes en: fuentes puntuales, lineales, de superficie y volumen.

El 9 de diciembre de 2006, AERMOD es totalmente promulgado como un reemplazo para ISC3 y la Agencia lo establece como modelo para la dispersión de contaminantes en el aire, el cual permite analizar la concentración y deposición de la contaminación atmosférica originada por diversas fuentes. El modelo está diseñado para estimar las concentraciones de contaminantes y la deposición procedente de un complejo de fuentes industriales. El modelo predice la concentración de los contaminantes desde el punto continuo, llamarada, área, línea, volumen y fuentes a cielo abierto

Otro de los modelos recomendados, es la versión del modelo de dispersión en alta mar y las zonas costeras (OCD por sus siglas en inglés), definido como una línea recta modelo gaussiano, desarrollado para determinar el impacto de las emisiones en alta mar a partir de fuentes puntuales, de área o línea de la calidad del aire de las regiones costeras. OCD incorpora el transporte sobre el agua y la dispersión de la pluma, así como los cambios en el comportamiento del contaminante por los cambios de superficie en la línea costera. Para el uso de esta aplicación se necesitan datos meteorológicos de lugares en alta mar y en tierra.

### **3.5 TECNOLOGÍAS DE CONTROL PARA EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO**

Las tecnologías utilizadas para el control de las emisiones de material particulado para fuentes fijas corresponden a:

**Ciclones:** son equipos de recolección de polvo que se usan con mayor frecuencia. Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa, basándose en el principio de impactación inercial, generado por la fuerza centrífuga. Son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias hasta del 90%; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas

**Multiciclones:** son básicamente un conjunto de pequeños ciclones de alta eficacia, reunidos en un colector común. Al igual que los ciclones ordinarios, separan las partículas del gas a tratar mediante el centrifugado del mismo. La

eficacia de los multiciclones para polvo con partículas entre 80 y 120 micras es del 95 al 98% <sup>12</sup>

**Lavador Venturi:** el lavador inyecta chorros finos de líquido (generalmente agua) a alta velocidad en la estrechura de un Venturi, el líquido se atomiza y se mezcla con la corriente de gases en la zona de expansión. Los lavadores Venturi pueden alcanzar el 99% de eficiencia en la remoción de partículas pequeñas. Sin embargo, una desventaja de este dispositivo es la producción de aguas residuales (Mejía & Oviedo, 2006). Las eficiencias de recolección de los depuradores tipo Venturi varían del 70 a más del 99 por ciento, dependiendo de la aplicación. Las eficiencias de recolección son generalmente más altas para la MP con diámetros aerodinámicos de aproximadamente 0,5 a 5 mm. Algunos depuradores tipo Venturi están diseñados con una garganta ajustable para controlar la velocidad de la corriente de gas y la caída de presión

**Precipitador Electrostático:** este dispositivo de control de partículas utiliza fuerzas eléctricas para mover las partículas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector. A las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a que pasen a través de una corona, una región en la cual fluyen iones gaseosos. El campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes, proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo. La eficiencia de estos equipos depende de factores como la humedad de los gases del efluente, la resistividad de la mezcla del gas, partículas, etc. Permite tratar grandes flujos de gas a altas temperaturas y posee buena eficiencia para la recolección de particulado fino

**Filtros de Mangas:** son considerados como los equipos más representativos de la separación sólido-gas. Su función consiste en recoger las partículas sólidas que arrastra una corriente gaseosa haciéndolas pasar a través de un tejido. En general, un filtro es una estructura porosa compuesta de material fibroso que tiende a retener las partículas según pasa el gas que las arrastra, a través de los espacios vacíos del filtro

---

<sup>12</sup> Echeverri, C. (2000). Determinación de las concentraciones de fondo de material particulado en suspensión en la ciudad de Medellín. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 20, 7-19.



#### 4. CRITERIOS AMBIENTALES DE MANEJO

El material particulado producido en una explotación de MCCA es conocido comúnmente como polvo. Se presenta en tamaños que varía entre 1 y 1000  $\mu\text{m}$  y su composición química varía en función de las características del material del cual se desprende. Debido a su bajo peso se deposita en la superficie terrestre y sobre la vegetación por acción de la gravedad.

El polvo causa serias molestias a las personas que se encuentran expuestas a los niveles de inmisión habituales de una explotación minera, y puede desencadenar en ellas enfermedades tales como la silicosis y la asbestosis. De igual forma, puede ocasionar molestias a las comunidades que se encuentran dentro del área de influencia de la operación, al disminuir la calidad del aire respirable. La vegetación se afecta seriamente por la depositación de polvo sobre su superficie foliar, obstruyendo los estomas y disminuyendo su capacidad para tomar el dióxido de carbono atmosférico, el agua y la energía solar, necesarias para la realización de la fotosíntesis.

Tanto las escombreras como las pilas de suelo conservadas para restaurar, son superficies que, por estar conformadas por material suelto, permanecen expuestas a la acción del viento o erosión eólica, la cual se ve favorecida por la velocidad y turbulencia del viento, dando lugar a tres tipos de movimientos de las partículas: saltación, deslizamiento superficial y suspensión. Cualquiera de estos movimientos se ve agravado por los climas secos, ausencia de vegetación, tráfico de vehículos, etc.

De acuerdo con Chepil, citado por el Instituto Tecnológico Geominero de España (1989: 81), la erosión eólica se produce de por los siguientes mecanismos:

**Detrusión:** Dislocamiento de las partículas de roca proyectadas desde la superficie y bombardeo de las partículas erosivas impulsadas por el viento.

**Efluición:** Remoción de las partículas con diámetros entre 0,005 y 0,5 mm causada principalmente por saltación.

**Extrusión:** Empuje activo de las partículas de suelo que son demasiado gruesas para ser removidas por saltación.

Eflación: Remoción de las partículas finas susceptibles de ser transportadas en suspensión, dejando los granos más gruesos en el terreno.

Abrasión: Destrucción de las partículas bajo el impacto de otras partículas que se mueven por saltación.

## **FACTORES DE EMISIÓN**

Se entiende por emisión, la cantidad total de material que se desprende a la atmósfera desde las diferentes fuentes que lo originan. El comportamiento y difusión del polvo en la atmósfera es función de sus características intrínsecas y de las condiciones meteorológicas locales; por tal razón y, tratándose de fuentes de emisión móviles y/o fugitivas, la evaluación de la contaminación atmosférica.

### **Modelo de dispersión de material particulado**

Es un modelo de simulación matemática elaborado con base en aquellos elementos que determinan la presencia de materiales que contaminan la atmósfera (material particulado para el caso específico) y aquellos factores que inciden en la presencia y diseminación de éstos (velocidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica, temperatura del aire). Mediante la aplicación de un modelo de dispersión de material particulado se puede determinar el nivel de concentración de las partículas en suspensión, presentes en la atmósfera circundante del área del proyecto minero, en sitios claramente definidos de acuerdo con la dirección dominante de los vientos y la posición geográfica de los mismos, en las áreas de influencia inmediata, mediata y remota de la explotación.

### **Red de monitores**

Con base en los resultados del Modelo de dispersión de material particulado se determinará la configuración de la red básica de monitores (muestreadores) y su localización dentro del área de influencia del proyecto minero. Los sitios para la localización de muestreadores serán seleccionados de acuerdo con la influencia de las fuentes de emisión de material particulado (condiciones viento abajo, viento arriba), la topografía del sitio, las condiciones meteorológicas puntuales y el tiempo de permanencia en el aire del material particulado. El número de monitores será mayor, si se espera una alta variabilidad de las concentraciones del contaminante en el área de estudio.

De acuerdo con lo anterior, los monitores deberán ser ubicados lo más cerca posible a las fuentes de emisión. Generalmente, se requerirán de uno a cuatro sitios de muestreo para cubrir múltiples fuentes, siendo las áreas más impactadas, las más recomendables para la instalación de muestreadores. Los factores de accesibilidad, seguridad, fuente de energía, etc. deberán ser evaluados para decidir la instalación de un monitor.

## **Criterios para la ubicación de monitores**

### **Altura de los monitores**

La altura más aconsejable para la ubicación de un muestreador de partículas totales en suspensión es aquel que coincide con la zona de respiración media de los seres humanos. Sin embargo, para evitar el vandalismo y proteger los equipos de otras posibles agresiones, se recomienda instalarlos en forma elevada, sobre una estructura que le sirva de soporte.

### **Distancia respecto a obstáculos**

Si el monitor va a ser instalado sobre un techo o estructura similar, deberá separarse por lo menos dos metros de paredes, cornisas o similares. Además, ningún tipo de flujo proveniente de chimeneas o incineradores deben estar próximos, especialmente si dichos flujos son el resultado de la combustión de fuel oil, carbón o residuos sólidos.

Como quiera que las partículas suspendidas también se depositan sobre las hojas de los árboles, los monitores deberán instalarse a por lo menos veinte metros de distancia de éstos.

Los efectos de obstáculos tales como edificaciones deben ser eliminados, asegurándose que la distancia entre el obstáculo y el muestreador esté a por lo menos dos veces la altura de excedencia entre ellos. Además, debe existir un flujo de aire en un arco no inferior a 270° alrededor del muestreador. La dirección predominante del viento para la época de máximas concentraciones esperadas, debe estar incluida en este rango.

## **Distancia a carreteras**

La proximidad de los monitores a vías de alto tráfico vehicular influye de manera directa en el registro de altas concentraciones de material particulado. Se recomienda evaluar en detalle las distancias óptimas para la ubicación de monitores con relación a las vías, teniendo presente que, en ningún caso, es aconsejable la ubicación de muestreadores en vías sin pavimentar.

## **Tipo de monitores**

- Muestreador de alto volumen, conocido comúnmente como Hi - Vol (High Volumen). Denominado así por el alto volumen de aire que filtra durante 24 horas de muestreo. Las mediciones de partículas realizadas con muestreador de alto volumen son susceptibles de variación debido a la presencia aleatoria de partículas grandes generadas en fuentes fugitivas cercanas y por las diferencias de eficiencia de captura de partículas según la velocidad y dirección del viento.

- Muestreador de aire respirable PM10. Se utiliza básicamente para la determinación del material respirable menor de 10  $\mu\text{m}$ . Este muestreador funciona como un equipo de alto volumen, pero además dispone de un cabezote de entrada de gases que excluye un alto porcentaje de las partículas mayores de 10  $\mu\text{m}$  y admite primordialmente el material particulado respirable. El PM10 garantiza muestreos más representativos de la calidad de aire en el sitio de muestreo, por cuanto éste no es sensible a los cambios de velocidad y dirección de los vientos.

## **Frecuencia de muestreo**

De acuerdo con el Decreto 02/ 82 , para material particulado se recomienda tomar una (1) muestra en forma continua, durante 24 horas cada 3 días.

## **Método de análisis**

Se recomienda el método gravimétrico.

Norma de Calidad del aire

Corresponde al promedio geométrico de los resultados de todas las muestras diarias recolectadas en forma continua durante 24 horas, en un intervalo de 12 meses, el cual no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico (100m g/m<sup>3</sup>). La máxima concentración de una muestra recolectada en forma continua durante 24 horas que se puede sobrepasar por una sola vez en un período de 12 meses, es de cuatrocientos microgramos por metro cúbico (400 m g/m<sup>3</sup>).

### **Norma local de calidad del aire**

Norma local = Norma de calidad en C. de R. \* (p.b.Local / 272+t°K)\* (298°K / 760 )

Dónde :

C. de R. = Condiciones de referencia a 25°C y 760 mm de mercurio

p.b. Local = Presión barométrica local, en milímetros de mercurio

t°C = Temperatura promedio ambiente local, en grados centígrados

## 5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y CONTROL

Estas son algunas de las medidas que se toman para la prevención y control en cuanto a la emisión del material particulado:

1. Emplazar los patios de carbón y áreas de servicio (infraestructura de soporte) en sitios estratégicos que queden por fuera del área de influencia de las fuentes de emisión de polvo, utilizando como criterio básico la dirección dominante de los vientos. Esta actividad deberá ejecutarse durante la fase de desarrollo del proyecto.

2. Acondicionar captadores de polvo a los equipos de perforación, con lo cual se lograría la recuperación de material particulado altamente peligroso para los operadores (menor de 5 micras), se reducirían los costos de mantenimiento y de perforación y se lograrían velocidades de penetración más altas y mejores condiciones de trabajo. Si las formaciones rocosas a atravesar presentan agua, se emplea la inyección de espumantes o de agua más espumante para facilitar la eliminación de polvo.

3. Durante la preparación de la voladura se deberán retirar de la superficie los detritus de la perforación y, utilizar para el retacado, material granular de préstamos, tacos de arcilla o tacos hidráulicos, si se trata de barrenos especiales.

4. Para el tránsito de vehículos (camiones, equipo pesado y vehículos de servicio) se recomienda la implementación de alguno de los métodos que a continuación se describen, o, cuando así se requiera, la combinación de dos o más de los mismos.

### **Control de velocidad**

Deberá instalarse dentro del proyecto minero una adecuada señalización (preventiva e informativa), con el fin de regular la velocidad de desplazamiento de los vehículos. En algunos casos, podrán implementarse algunos reductores de velocidad, para forzar la disminución de la velocidad de los vehículos. Acompañando las anteriores medidas, deberá implantarse un programa de sensibilización y de educación a los diferentes niveles de la organización

empresarial, con el fin de que los objetivos perseguidos para estos efectos, sea el más eficaz.<sup>13</sup>

## **Riego con agua**

Es un método bastante económico y efectivo, aunque en zonas áridas y en épocas de estiaje su implementación presenta serias restricciones por la disponibilidad de agua; sin embargo, para garantizar un suministro continuo de agua para riego, dentro del proyecto deberán construir grandes reservorios de agua ("pondajes"), los cuales permitirán hacer las provisiones necesarias. Para la operacionalización de este método es necesario implantar un programa de riego, el cual deberá considerar como mínimo, los siguientes aspectos: áreas a regar, requerimientos de agua, fuentes de captación, equipo necesario, ruteo y frecuencia de aplicación (ciclos).

## **Estabilizantes químicos**

Existen tres tipos de sustancias químicas de empleo común en este tipo de proyectos: agentes humificadores, sales higroscópicas y agentes creadores de costra superficial. Los agentes humificadores operan reduciendo la tensión superficial del agua, consiguiendo humedecer el polvo más fino, que es el de más difícil control.

Las sales higroscópicas atraen el vapor del agua de la atmósfera, retrasan la evaporación de sus soluciones con el agua y elevan la humedad de la capa superficial de las vías. Además, el aumento de la humedad incrementa la cohesión y compactación de los materiales de las pistas, dando como resultado una reducción importante de polvo. Las sales de mayor uso son el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

Los agentes creadores de costra superficial pueden estar constituidos por lignosulfonatos, resinas sintéticas, compuestos vinílicos, polímeros sintéticos, etc. Se suelen aplicar en húmedo y tras su secado se consigue la formación de una costra que permite un buen control de polvo con una eficiencia próxima al ciento por ciento.

---

<sup>13</sup> MANEJO AMBIENTAL DE POLVO. Página web. Disponible en [http://www.upme.gov.co/guia\\_ambiental/carbon/gestion/guias/min\\_cab/contenid/medidas2.htm](http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_cab/contenid/medidas2.htm). Consultado el 3 de junio del 2015

## **Láminas filtrantes sintéticas**

Estas láminas, también llamadas geotextiles, se utilizan en la estabilización de suelos, drenaje, control de la erosión, etc. Ensayos realizados extendiendo estas láminas sobre las pistas y cubriéndolas con material granular grueso han demostrado que además de conseguirse un diseño óptimo y mantenimiento reducido se disminuye la cantidad total de partículas suspendidas en un 58% y de partículas respirables en casi un 46%, dependiendo de la naturaleza del material de subbase y de la capa de rodadura.

## **INICIATIVAS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD AMBIENTAL EN COLOMBIA**

Deberíamos implementar en Colombia acciones sobre protección a la salud y el ambiente, en particular en relación con la minería. Se trata de aspectos que no dependen exclusivamente de legislaciones, sino de iniciativas exitosas de cambio. De hecho, muchos problemas de salud dependen poco de la existencia de normas, y más de vigilancia, acompañamiento, responsabilidad social y ante todo, presencia estatal.

En Colombia, el Ministerio de Minas y Energía, básicamente controla todas las actividades mineras, con poca o ninguna articulación con las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) y otros ministerios. Por ello, esta dependencia estatal se beneficiaría mucho de un Consejo sobre Calidad Ambiental, el cual garantizaría que los valores ambientales y riesgos sobre la salud humana sean considerados a la hora de la toma de decisiones. En EEUU, este consejo fue creado por el Congreso en 1969, y es una dependencia que asesora a la Casa Blanca

Uno de los problemas coyunturales que en materia de control ambiental existe en el país es el recurso humano y la infraestructura con que cuentan las CARs. A diferencia de lo que ocurre en las instancias internacionales, por ejemplo, en la Agencia de Protección Ambiental de USA (EPA), estas entidades no tienen personal calificado. Muy pocos poseen maestría, y contar con doctores es un lujo. Sumado a esto, los laboratorios se limitan a prestar servicios para captar recursos, sin programas efectivos y permanentes de monitoreo de contaminantes ni en humanos ni en muestras ambientales. Así, las posibilidades de generar discusión con argumentos científicos, datos de campo y evaluaciones sólidas de impacto son en extremo bajas. Esta es una desventaja que aprovechan las multinacionales mineras, quienes pueden contratar a asesores internacionales, con los cuales nuestros funcionarios sencillamente no pueden discutir. Algo similar ocurre en el Congreso, en donde



la interacción entre los académicos del país y los legisladores es pobre, y cuando existe, las recomendaciones no son tenidas en cuenta.

Nuestro país en general, en especial sin sacrificar el sueño de alcanzar un desarrollo sostenible a partir de procesos de extracción de minerales, lo cual es casi que virtualmente imposible si no se coloca un mínimo de valor agregado a los mismos, puede beneficiarse de una ley que considere enfrentar los problemas derivados de los pasivos ambientales de la minería, en especial la destrucción del suelo y la acumulación de materiales, algunos peligrosos, derivados de esta actividad.

En un país en donde la educación de la mayoría de la sociedad no es una prioridad real, es de suma importancia garantizar que las comunidades tengan la información pertinente, científica y actualizada sobre los impactos de la minería sobre la salud y los ecosistemas. Existe la Ley de Planificación de Emergencias y Derecho Comunitario a la Información. Expedida en 1986, esta normativa establece los requisitos de las autoridades para que las personas conozcan sobre las sustancias químicas y peligrosas empleadas o generadas en las empresas, así como los reportes a partir de los accidentes en las mismas. Una ley de esta naturaleza, implementada al menos en un porcentaje reducido, generaría cambios de conducta y compromisos tanto en los gobiernos locales, como en las comunidades afectadas.

## CONCLUSIONES

La explotación a cielo abierto de carbón genera considerables emisiones de material particulado que afectan a las personas que se encuentran al interior de los frentes de explotación, a las comunidades que habitan en el área de influencia de las minas carboníferas y a la fauna y flora de los ecosistemas intervenidos por las prácticas mineras.

Las operaciones mineras en el país generan impactos ambientales en el componente atmosférico sin excluir al hombre. La producción de estas partículas tiene una alta incidencia en las tasas de emisión de contaminantes atmosféricos. Entre el 1% y el 4% de la mortalidad de la población se atribuye al material particulado suspendido en el aire, según la OMS. En nuestro contexto, sin embargo, las medidas demandan un largo tiempo en tomarse, y su efectividad es muy limitada. Repercutiendo en la salud de los trabajadores y de las poblaciones que se encuentran en las áreas de influencia de la mina. Este material particulado afecta a las vías respiratorias del ser humano produciendo enfermedades crónicas como la bronquitis, pulmonías, entre otras.

Las enfermedades pulmonares se relacionan con la inhalación de distintas partículas, como el polvo de carbón (pulmón negro), polvo de algodón (pulmón pardo), fibras de asbesto (asbestosis) o polvo de sílice (silicosis). Los agentes ambientales son capaces de producir cambios biológicos en el individuo sin que existan manifestaciones clínicas.

## BIBLIOGRÁFIA

Aerosol e Investigación de Calidad del Aire, 10, 301-315.

Chakraborty, MK, et al., 2002. Determinación de la tasa de emisión de diversas operaciones de minería a cielo abierto. Modelado y software 17 del Medio Ambiente, 467e480

Chaulya, SK,. Instituto Central de Investigación Minera, Barwa Road, Dhanbad.2005

CORPOCESAR, Informes de calidad del aire (tablas) N° 3 al 9 de la red de monitoreo en zona minera del Cesar

DANIEL FERNANDO PRATO SÁNCHEZ. Modelación de la dispersión de material particulado en zona minera del cesar, Colombia, usando fluent (cf). Universidad EAN.2012

El Dr. John F. Wendt, 2009. dinámica de fluidos computacional una introducción. Von Instituto Karnan.)

MAVDT mediante Resolución No. 601 de abril 4 de 2006

MAVDT Resolución 386 de 2007 Aéreas fuentes zona minera del cesar

Rafael Ballesteros Tajadura, et al., Técnicas numéricas en mecánica de Fluidos. Universidad de Oviedo, 2003.

Sinha, S., Banerjee, SP, 1997. Caracterización de los caminos de acarreo en abierto. El medio ambiente atmosférico 31, 2809e2814.

# **ANEXOS**

## IMÁGENES DE MATERIAL PARTICUALDO







