



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTRATEGIA DE PREVENCIÓN, CONTROL Y
MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS
PROVENIENTES DE ACTIVIDADES DE EXPLOTACIÓN
MINERA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO**

Argemiro Jesús de la Ossa Jiménez

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2019



Estrategia de Prevención, Control y Mitigación de las Emisiones atmosféricas
provenientes de Actividades de Explotación Minera de Carbón a Cielo Abierto

Argemiro Jesús de la Ossa Jiménez

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
Especialización en Gestión Ambiental

Asesor:

Luis Ariel Trejos Melchor, Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2019

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
2. MARCO TEORICO	5
2.1 Equipos para medición de material particulado.....	7
2.2 Estimación de Emisiones en Minería Cielo Abierto.	8
2.3 Medidas de prevención, control y mitigación de material particulado.....	9
2.3.1. Evaluación de productos para el control de polvo ambiental en vías de minas a cielo abierto.....	9
2.3.2. Predicción y análisis de la contribución de PM₁₀ desde pilas de Carbón en una Mina a Cielo Abierto.....	11
2.3.4 Modelación de la propagación de incendios de gran escala producidos por la combustión espontánea en los frentes de explotación en Minería de Carbón a cielo abierto y diseño de estrategias de apagado.	13
2.3.5. Estudio comparativo de supresores de polvo Dasaut, DL10 plus y Knockout Dusply para la mitigación de material particulado en vías Yanacocha 2018.	15
2.3.6. Estudio técnico – Económico del uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en la unidad minera Toquepala – Spcc.	16
2.3.7. Acciones de control y mitigación en CERREJON.	17
3. METODOLOGIA	19
3.1 Identificación de fuentes de emisión en el proceso de extracción del carbón.	20
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	22
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	30

GLOSARIO

Autocombustión: El carbón es un material susceptible a la combustión espontánea por tener una temperatura crítica de autocalentamiento, conocida como Self-Heating Temperature (SHT) que es la temperatura mínima en que los materiales se queman de manera espontánea, formando una reacción exotérmica que en caso que llegue a esta temperatura la tasa de oxidación se acelere (Pone, y otros, 2007)

Anfo: Explosivo de alta potencia producto de la mezcla de nitrato de amonio y combustible derivado del petróleo.

Carbón: Roca sedimentaria de origen vegetal que proviene de la acumulación y alteración fisicoquímica de materia vegetal. Es el segundo recurso natural no renovable después de petróleo, usado para procesos industriales, tecnológicos.

Contaminante: Sustancia que se encuentra en un medio al cual no pertenece o que lo hace a niveles que pueden causar efectos adversos a la salud o el medio ambiente.

Descapote: Material estéril que se remueve para obtener una cantidad de material aprovechable.

Explotación: Conjunto de elementos o instalaciones destinadas para sacar provecho de un producto natural.

Minería: Actividad productiva que extrae, procesa y transforma minerales o materiales del subsuelo para usos industriales, energéticos, de construcción, metálicos o domésticos.

Material particulado: El material particulado forma parte de la contaminación del aire y es una mezcla de partículas sólidas y líquidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas que se encuentran en suspensión en el aire, clasificadas en función del diámetro aerodinámico que son partículas inhalables y no inhalables

Nitrato de amonio: Es una sal formada por iones de nitrato e iones de amonio. Cuando se combina con un combustible derivados del petróleo produce el explosivo conocido como Anfo.

PM_{2.5}: Son partículas en suspensión muy finas con un diámetro de hasta 2.5 μm , menos que el grosor de un cabello humano, que pueden penetrar hasta las zonas de intercambio de gases del pulmón y pueden llegar al torrente circulatorio.

PM₁₀: Son partículas sólidas o líquidas en suspensión con fracciones finas y gruesas con un diámetro de hasta 10 μm que pueden penetrar hasta las vías respiratorias bajas.

RESUMEN

El carbón es el segundo recurso natural no renovable después del petróleo, usado para procesos industriales, tecnológicos y hace parte del sustento económico y de desarrollo de las naciones. En la actualidad los ingresos por la minería del carbón se consideran un pilar básico de las economías, razón por la cual hay que legislar para mitigar los impactos ambientales y sociales generados en sus procesos productivos. Como técnica de extracción minera existe la explotación del carbón a cielo abierto, que cubre áreas de varios kilómetros cuadrados donde se utilizan equipos de gran magnitud, como palas frontales, retroexcavadoras, motoniveladoras, cargadores, camiones y uso de explosivos. Todas estas actividades en conjunto, generan cantidades de emisiones de polvo tóxico, que están relacionados con la extracción, transporte y uso de explosivos, teniendo su razón principal en la disgregación de la roca, por el proceso de voladuras, de cargue, de transporte (que combina las partículas procedentes del yacimiento y la de las vías), procesos de apilamiento de carbón, de descargue de estéril en vertederos y por auto combustión del carbón; todas estas emisiones llegan a la atmósfera y generan efectos notables sobre la salud humana reduciendo las expectativas de vida de los mineros, de las comunidades e impactos ambientales, por eso es necesario realizar mediciones de la concentración de este contaminante en la atmósfera, evaluar cómo se comporta en el espacio y tiempo para predecir los riesgos e impactos y poder establecer, estrategias de control y seguimiento por parte de las autoridades ambientales. Para enfrentar esta problemática existen herramientas tecnológicas y equipos que se utilizan como diagnóstico y predicciones que ayudan a implementar programas de prevención en todos los procesos extractivos del carbón, que son cuantificados por redes de monitoreo de calidad del aire y mitigados mediante modelos de dispersión atmosférica para predecir concentraciones de polvo en diferentes escenarios, regado con tanqueros y camiones cisternas en vías de acarreo, uso de supresores de polvo, alerta temprana para establecer acciones de control, riego con aspersores en las áreas de avance minero, control de la combustión espontánea en mantos de carbón y minimización de los gases nitrosos en los procesos de voladuras. En este trabajo de monografía consideramos importantes los métodos que se están utilizando por muchas minas a nivel mundial para poder mitigar las emisiones de material particulado.

Palabras clave: Carbón, Minería, Explotación, Emisiones, Contaminante, PM₁₀, PM_{2.5}.

ABSTRACT

Coal is the second non-renewable natural resource after oil, used for industrial, technological processes and is part of the economic and development support of nations. At present, revenues from coal mining are considered a basic pillar of the economies, which is why we must legislate to mitigate the environmental and social impacts generated in their production processes. As a mining technique, there is the exploitation of open pit coal, which covers areas of several square kilometers where large-scale equipment is used, such as front shovels, backhoes, graders, loaders, trucks and use of explosives. All these activities together generate quantities of toxic dust emissions, which are related to the extraction, transport and use of explosives, having their main reason in the disintegration of the rock, due to the blasting, loading, transport process (which combines the particles coming from the deposit and that of the tracks), coal stacking processes, unloading of sterile landfills and self-combustion of coal; All these emissions reach the atmosphere and generate significant effects on human health by reducing the life expectancy of miners, communities and environmental impacts, so it is necessary to measure the concentration of this pollutant in the atmosphere, evaluate how behaves in space and time to predict risks and impacts and to establish control and monitoring strategies by environmental authorities. To address this problem, there are technological tools and equipment that are used as diagnosis and predictions that help to implement prevention programs in all the extractive processes of coal, which are quantified by air quality monitoring networks and mitigated through atmospheric dispersion models to Predict dust concentrations in different scenarios, irrigated with tankers and tankers on haul roads, use of dust suppressors, early warning to establish control actions, sprinkler irrigation in the areas of mining progress, control of spontaneous combustion in mantles of carbon and minimization of nitrous gases in blasting processes. In this monograph work we consider important the methods that are being used by many mines worldwide to be able to mitigate the emissions of particulate matter.

Keywords : Coal, Mining, Exploitation, Emissions, Pollutant, PM₁₀, PM_{2.5}.

INTRODUCCION

Las emisiones de material particulado que provienen de las actividades mineras cuando estas, se hacen a cielo abierto generan contaminación ambiental, daños a las personas y su entorno. Esta actividad se ha venido desarrollando desde hace muchos años a nivel mundial, pero ha deteriorado la calidad del aire, sin embargo, se han desarrollado estrategias para prevenir, controlar y mitigar las emisiones que se generan en todos sus procesos; de tal manera que sean controladas e impacten en menor proporción las zonas de influencia directa o indirecta de los proyectos mineros.

En la actualidad las actividades mineras a Cielo abierto han realizado estudios de impactos ambientales y han identificado todas las afectaciones que esta industria representa, dado que las minas han expandido su producción y los mercados han crecido aceleradamente, todas estas evoluciones han hecho que la minería este en línea con los avances tecnológicos y haya búsqueda de mecanismos que logren disminuir los impactos ambientales.

Desde hace mucho tiempo, se sabe que respirar el material particulado que se produce en las minas es perjudicial para la salud. Georgius Agrícola, científico alemán (De Re metálica, 1556) ya hablaba de los efectos del material particulado en la salud de los mineros. La exposición de los trabajadores en minas a cielo abierto varía entre 2-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en frentes de extracción de carbón y 1-2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en extracción de estéril, continúan las vías de acarreo, las perforaciones (fuente más importante de polvo fugitivo) que su concentración de polvo varía entre 20-25 μm^3 y en bancos de carbón de 1-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Chaulya (2003) con base a mediciones estableció excedencias en los límites permisibles de la calidad de aire en la India y recomendó la utilización de cinturones verdes para las áreas que las superaban. Las máximas concentraciones de material particulado se presentan en el verano y disminuían durante el invierno.

Ghose (2006, 2007^a, b, c) y Ghose y Benerjee (2008) concluyeron que la contribución real de las emisiones en minería a cielo abierto y su dispersión pueden ser evaluados mediante la técnica de análisis fractal. Todos los trabajos de investigación se centran en las fuentes móviles y fijas, pero son pocos los trabajos en fuentes fugitivas.

Mirando el panorama mundial la India y la China son afectados por esta contaminación donde registran concentraciones medias anual de PST mayor a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta exceder 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

(según OMS, 2004) mostrando que por cada aumento de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aumenta en más del 6% los casos de bronconeumonía en áreas donde se usa el carbón. En otros países como Brasil hay tasa de mortalidad por neumonía por cada aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las PST.

Como referencia nacional las redes de monitoreo revisan algunas evaluaciones de la norma con valores superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, hay áreas y zonas del país que adolecen de sistemas de control y vigilancia de la calidad del aire.

Estas industrias cuentan desde el 2007 con red de monitoreo dirigidas por las corporaciones autónomas regionales que miden tanto calidad del aire como el que sale de estos proyectos, los cuales miden partículas menores a $10\mu\text{m}$ (PM_{10}).

Para el caso de la Jagua en el Cesar se han reportado valores que han superado límites permisibles teniendo en cuenta que estas industrias han duplicado sus volúmenes de extracción en los últimos años.

Hay estudios realizados (Hernández et al, 2007) que aun estando los niveles de concentración de material particulado por debajo de la norma están asociados con efectos nocivos de la salud dado que el sistema respiratorio es la entrada al organismo de material particulado.

Los convenios para la protección de la capa de ozono se dan en el convenio de Viena en 1990 y en Colombia se crea la Ley 29 de 1992 como una adhesión al protocolo de Montreal donde se establecieron metas para reducir las concentraciones contaminantes atmosféricas.

En 1992 se creó el Ministerio del Medio Ambiente, pero solo se fijaron los límites permisibles en 1995 Decreto 948 que deroga la Ley 02 de 1982, en el 2010 se adoptó la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire (PPCCA), en el 2016 el Decreto 1076 de 2015 estableció normas de prevención y control de la contaminación atmosférica proveniente de actividades mineras, industriales y de transporte, y, en general, las ocasionadas por toda actividad o servicio público o privado. En la resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017 se adopta la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, estableciendo niveles máximos permisibles a partir del primero de enero de 2018. Con estos seguimientos y controles los trabajadores y comunidades vecinas de estos complejos mineros tienen soporte jurídico para que se respeten sus derechos a tener un entorno saludable y que se puedan realizar una operación minera de manera responsable.

La gran mayoría de las minas a cielo Abierto tienen retos importantes y la razón para seguir funcionando es que todas sus operaciones donde se generan emisiones se logren controlar.

1.1 Planteamiento del problema

Las consecuencias ambientales por la minería a cielo abierto generan impactos ambientales, como la contaminación del aire por las cantidades de material particulado que genera esta industria. La extracción de minerales como el carbón es una actividad común a nivel mundial y es una de las principales causas de la contaminación del aire. En las últimas décadas las fuentes fugitivas han incrementado la contaminación atmosférica y es un problema complejo a nivel mundial; en aras de reducir los niveles de contaminación por las emisiones generadas por esta actividad se han evaluado diferentes alternativas de revisar la fuente donde se genera el impacto para establecer medidas que ayuden a prevenir, controlar y mitigar las fuentes de emisiones en cada uno de las acciones que se dan en el proceso extractivo del carbón, iniciando desde el montaje del complejo minero, las exploraciones, los procesos de voladuras, combustión tanto del diésel como del mineral, las generadas por los vientos, tráfico, transporte de estéril y carbón, apilamientos de carbón y estéril, transporte del mineral en trenes y cargue de barcos.

El material particulado se origina a partir de una gran variedad de fuentes naturales y son un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas presentes en suspensión en la atmosfera (Mészáros, 1999) y su presencia ocasiona impactos al medio ambiente y está asociado en el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos (Pope, 2004), por eso es importante conocer la composición química del material particulado porque muchas partículas pueden influir de manera importante en el aire y sus efectos en el ambiente y la salud.

Lo más importante en esta monografía es conocer estrategias implementadas con el fin de controlar las emisiones de material particulado en la industria minera para disminuir los aportes de las fuentes reales que deterioran la calidad de vida de los humanos y su entorno, resaltando los avances de la Ingeniería en encontrar mecanismo que nos ayuden a predecir, controlar y mejorar los riesgos e impactos a los que estamos expuestos por presencia de partículas en el medio ambiente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Establecer estrategias que permitan prevenir, controlar y mitigar las emisiones de material particulado que se puedan generar en las diferentes actividades del proceso de extracción de carbón en minería a cielo abierto.

1.2.2 Objetivos específicos

Identificar las actividades derivadas del proceso de extracción de carbón a cielo abierto que generan emisiones de material particulado a la atmosfera.

Clasificar las actividades en orden de aporte emisiones de material particulado a la atmosfera.

Determinar las medidas más eficientes de prevención, control y mitigación de material particulado en un proyecto de minería de carbón a cielo abierto.

2. MARCO TEORICO

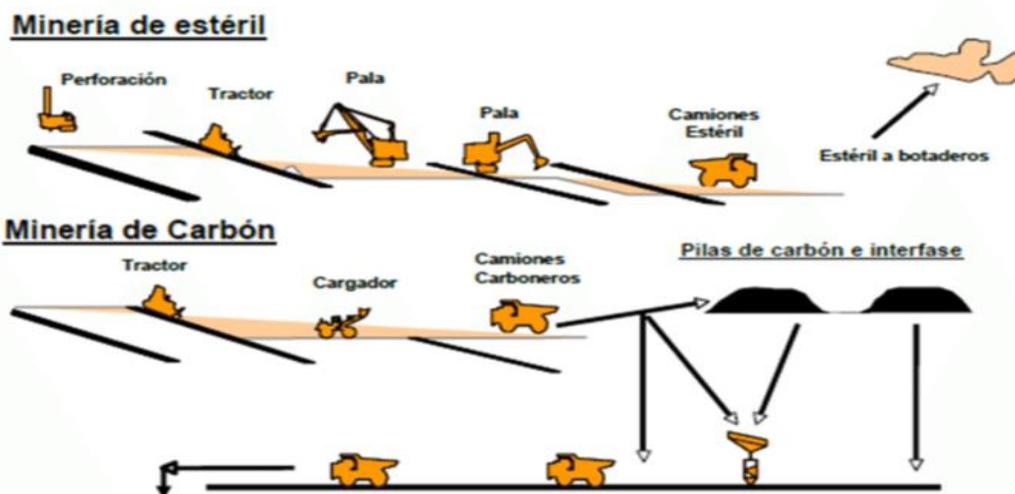
El carbón mineral es una roca sedimentaria que se emplea hace más de 3000 años en la producción de energía y cuando surge muy cerca de la superficie su forma más económica de extracción es a través de la minería a cielo abierto.

La Minería a Cielo abierto es una actividad industrial que consiste en explotación Minera desarrollada en la superficie del terreno que a diferencia de la subterránea se desarrolla por debajo de la superficie. La diferencia entre los dos métodos se debe a motivos económicos, sociales y ambientales, sin embargo, la decisión de explotación se basa en que tan cercano está el mineral de la superficie y la relación de descapote (Material estéril que remueve para obtener una cantidad de material aprovechable). El proceso de extracción en Minería a cielo abierto es mucho más contaminante que la minería que se llevan a cabo de forma Subterránea y genera deterioro en la calidad del aire, debido al material particulado y a los contaminantes gaseosos emitidos a la atmosfera (Ghose, 2007), todo esto derivado de los grandes volúmenes de material removido para extraer el carbón.

En todo el proceso de producción en Minería de Estéril y de Carbón, el aire puede contaminarse por presencia de polvo en cada una las acciones que se llevan a cabo, iniciando desde las voladuras, pero siendo más contaminantes el transporte en Camiones de Estéril y de carbón que tienen su origen en el levantamiento de partículas por la disgregación de las rocas durante su recorrido y es donde se concentran más cantidad de equipos. El proceso de cargue genera emisiones, pero es más fácil de retener y controlar porque se localizan en los frentes de cargue. Para el caso de los apilamientos de carbón es otra fuente importante de polvo, pero se manejan de manera transitoria y están en áreas destinada para esta actividad.

En todo el proceso de producción se requiere conocer las características de las emisiones para poder seleccionar e implementar las mejores técnicas de control que ayuden a mitigar las partículas suspendidas en el aire que se generan en las voladuras, proceso de cargue, proceso de transporte, de apilamientos, por descargue en los botaderos de estéril y descargue en los apilamientos de carbón, autocombustion del carbón y las partículas que se originan por efectos de contaminación industrial.

Proceso de Producción



Fuente: Proceso de producción de Carbón a cielo abierto en Cerrejón.

El material particulado forma parte de la contaminación del aire y es una mezcla de partículas sólidas y líquidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas que se encuentran en suspensión en el aire, clasificadas en función del diámetro aerodinámico que son partículas inhalables y no inhalables (Daniles et al., 2000). Las inhalables son retenidas en las vías respiratorias, produciendo efectos a nivel de sistema respiratorio y las no inhalables tienen la capacidad de pasar el torrente sanguíneo con el riesgo de dañar cualquier órgano o sistema (Cantoni y Ronchetti, 2001). Las partículas de PM_{10} son las de gran tamaño y tienen diámetro teórico de $10\ \mu m$ y las de $PM_{2.5}$ son partículas finas con un diámetro de $2.5\ \mu m$. El material particulado posee diferentes propiedades morfológicas, químicas, físicas y termodinámicas (EPA, 2004) y es uno de los contaminantes más estudiados en el mundo y su presencia en la atmósfera ocasiona 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 (Chen, Ying & Kleeman, 2009), por lo que es necesario además de realizar mediciones de este contaminante, evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo para encontrar estrategias de control y realizar seguimiento por parte de las autoridades ambientales. Investigaciones relacionadas con este contaminante demuestran presencia de MP en la atmósfera por causas naturales y antropogénicas, indicándonos la necesidad de realizar estudios relacionados con el efecto causado por la presencia de este contaminante con el fin de implementar estrategias de control.

Identificación de Fuentes de Emisión, Proyecto Minero Cerrejón (

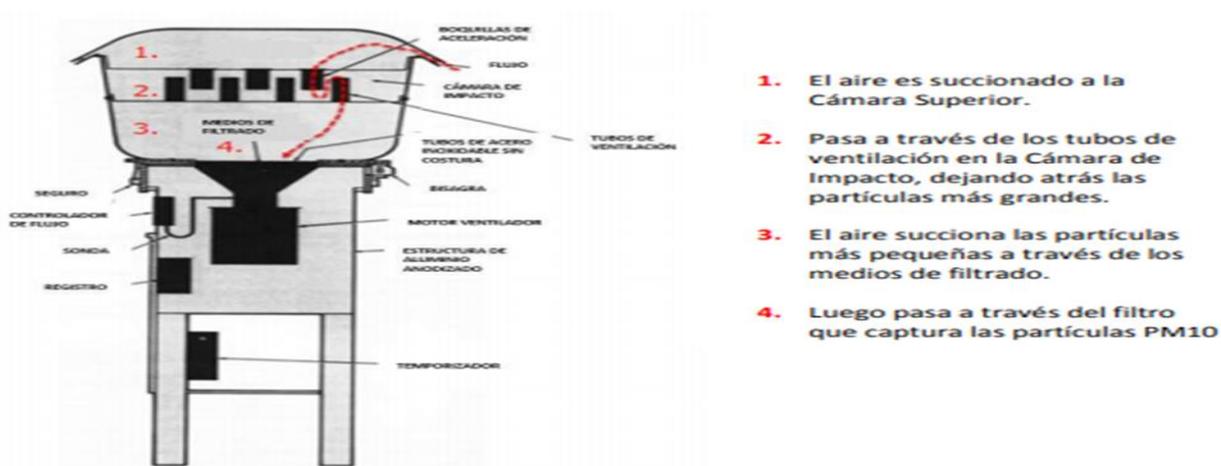
ETAPA	SUB-ETAPA	ASPI	FARI
Pre minería	Retiro de capa vegetal	Nivelaciones y rellenos	Todas estas actividades son susceptibles de generar impacto al componente físico del medio ambiente AIRE, algunos en mayor medida que otros debido a las medidas de control que se utilizan para su mitigación.
		Retiro de capa de suelo	
	transporte a pilas de almacenamiento de suelo		
Minería	Perforación y Voladura	Generación de finos y detritos	
		Voladuras - Detonación	
	Remoción de Estéril	Transporte de Materiales explosivos	
		Cargue de material estéril en camiones	
		Descargue de material estéril en botadero	
Remoción de Carbón	Transporte de camiones por vías internas temporales		
	Cargue de carbón en camiones		
	Transporte de carbon vías externas		
Transporte Externo	Almacenamiento en vagones	Descargue, apilamiento y/o trituración del carbón	
		Cargue de vagones de la Locomotora	
Puerto	Cargue de Buques	Transporte desde la mina a puerto bolívar	
		Descargue de carbón y apilamiento en pilas	
		Cargue de Buques	

(Vargas, 2015)

2.1 Equipos para medición de material particulado.

La concentración total de partículas en el aire se calcula como la masa recolectada dividida por el volumen del aire muestreado por el volumen y existen dos muestreadores de este tipo que se diferencian en su controlador de flujo, pueden ser de sistema MFC (controlador de flujo tipo másico) o VFC (controlador de flujo de tipo volumétrico) (MAVD, 2010). Hay otros equipos instalados sobre las personas que son bombas de muestreo personal y permite realizar mediciones de PM₁₀. Todos los equipos que se usan para la medición de MP succionan una cantidad de aire medible hacia una caja de muestreo a través de un filtro que es pesado antes y después para determinar su peso ganado. Según Garcia (2002) en las mediciones de partículas existen errores por interferencias, niveles de blancos y reproducibilidad de acuerdo a los métodos de muestreo. Para medir las concentraciones de MP se emplean equipos exclusivos para la medición de partículas respirables o medidores de alto volumen de PM₁₀ y miden exclusivamente partículas menores de 10 μ con criterios de ubicación de acuerdo al código de Regulaciones Federales de la agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (CFR 40).

Funcionamiento Estación de muestreo estación High Vol PM10



(CORPONOR, 2017)

2.2 Estimación de Emisiones en Minería Cielo Abierto.

Desde 1970, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US-EPA ha desarrollado gran variedad de modelos de dispersión atmosférica a la vanguardia del desarrollo tecnológico y científico, siendo reconocidos y utilizados a nivel mundial, por agencias encargadas de controlar, identificar y diseñar estrategias efectivas para reducir los contaminantes dañinos para el aire. Las metodologías más usadas para estimar los niveles de emisión desde estas fuentes se realizan mediante formulaciones empíricas como las contenidas en el reporte AP-42 de la U.S.EPA (Ap-42, Compilation of Air Pollutan Emission Factors). Para la estimación de los factores de emisión (E), se han utilizados formulas desarrolladas por la EPA Enviromental Protection Agency (Report AP-42) asociadas al tipo de fuentes de emisión, con el fin de determinar la tasa de emisión de varias actividades mineras (Chaulya et al., 2002). Un estudio realizado por Chadwick et al. (1987) sobre la minería del carbón a cielo abierto estima que alrededor del 50% del total del polvo de carbón, se libera durante el tiempo de viaje de un camión minero en una vía sin pavimento, mientras que el 25% en el cargue y descargue del mismo, el 25%. Vaquero (2007) estima que el 0.02% del carbón se pierde en forma de polvo fugitivo durante la carga para el transporte y un porcentaje similar se pierde en la descarga; el polvo de la vía formado en el recorrido es un espectro formado por partículas submicronicas hasta grandes piezas de unos pocos centímetros de diámetro, mientras que los camiones en su recorrido aplastan sobretamaños y las transforman en polvo fino.

La extracción y tratamiento del carbón producen emisiones de gran impacto como resultado de su misma actividad tales como transporte por vías sin pavimentar, voladuras, trituración, almacenamiento y autocombustión del carbón (emisiones de polvo fugitivo no controlados) generando material particulado, que pueden ser de carbón, suelo o estéril (Ghose y Majee, 2000) y son emitidas a la atmosfera por el viento, por la combustión y puntos de transferencia del material en los diferentes sitios de la mina que tienen consecuencias graves para la salud tanto de las personas que labran en el sitio como para las comunidades aledañas a estos complejos, las cuales varían de acuerdo a la exposición y a la cercanía. Las emisiones provenientes de la re-suspensión de polvo que se realizan en las minas presentan los valores de emisión más elevados junto con las emisiones provenientes del transporte por vías no consolidadas para el traslado del mineral para su comercialización (Cogliati, 2016).

2.3 Medidas de prevención, control y mitigación de material particulado.

2.3.1. Evaluación de productos para el control de polvo ambiental en vías de minas a cielo abierto.

En las operaciones mineras a cielo abierto las mayores fuentes de contaminación son material particulado, el cual es transportado por el viento y son el resultado de excavaciones, cargue, descargue y transporte de material, bien sea de estéril o carbón, más las emisiones gaseosas generada por autocombustión del carbón, voladuras y procesos del mismo mineral. Todas las contribuciones de emisiones comprometen la operatividad de la mina y la salud de las personas (Tapia 2017; Rada-Jaman 2017).

Por prácticas mineras tradicionales las emisiones de material particulado son mitigadas aglomerando las partículas de polvo por peso y humedad regando todas las áreas con agua, lo que genera su alto consumo que normalmente en altas temperaturas se evapora y donde las temperaturas son bajas genera condiciones de riesgo por vías resbalosas.

En este estudio identificamos diferentes supresores de polvo los cuales por sus características contribuyen a un efectivo control de las emisiones derivadas por las actividades de la Minería a cielo abierto.

Las pruebas fueron realizadas en vías por donde transitan equipos livianos, medianos y de gran escala en Minas a cielo abierto de Oro y Plata en Argentina que lograron mostrar y controlar con gran eficiencia mejoras sustanciales en la disminución en las emisiones de material

particulado. Para el desarrollo de este estudio se utilizaron diferentes métodos y productos para poder identificar el más eficiente para controlar las emisiones de polvo.

Los materiales y métodos utilizados fueron:

Melaza. Producto orgánico derivado de la caña de azúcar, que tiene un derivado industrial llamado SMARTER V55 que se comporta como excelente estabilizador de suelos y supresor de polvo. Para la prueba de este producto se verifico la solubilidad en agua y se hizo una solución de 6000lt de agua y 1000lt de melaza (14% de volumen) y se regaron las bermas de las vías. Las pruebas de este producto se hicieron en vías transitadas con riegos y una cantidad de melaza al 40% del volumen del tanque y se comprobó que con el paso de camiones presento aglomeración efectiva del terreno y retardo la emisión de polvo de 2 a 3 días; en la aplicación de las vías de equipo liviano logro controles hasta de 10 días. En vías donde el terreno fue escarificado con reeper y luego aplicado el producto evidencio más eficiencia en el control de polvo con circulación de camiones.

Hidróxido de magnesio, $\text{mg}(\text{OH})_2$. Polvo blanco granulado poco soluble en el agua, el cual a una solución al 27% se mantuvo homogénea logrando una sedimentación en el fondo y una capa de agua clara en la superficie de la solución. Al día siguiente de aplicado no se evidencio costras ni se consolido el material y se decidió aplicar en las vías por donde transitan los camiones.

TGC total, Ground Control, es una emulsión de polímeros con agente generador de costras en el largo plazo sobre cualquier tipo de material. La dilución se hizo al 2 y 3 % en volumen. Su efectividad fue probada en botaderos de la mina y formo costras de 1mm de espesor que por ser muy pequeñas se decidió descartar este producto en las vías de equipos livianos y pesados.

Cloruro de Sodio, ClNa . Para la prueba se hizo sobre la vía una carpeta de suelo-sal, previa humectación del área y se extendió con Motoniveladora, luego se humecta permitiendo la penetración de la solución salina. Su aplicación mostro una consolidación del terreno y evito acumulación de la nieve. Para mejorar su efectividad necesita que la sobre la superficie se riegue melaza o bischofita.

Bischofita, $\text{Cl Mg } 6 \text{ H}_2\text{O}$. Es una sal de magnesio soluble y se utiliza para estabilizar vías mineras. La dilución de prueba es 56000 kg de bischofita en 50000lt de agua en 1km de longitud,

estimando un consumo de 1,56 lt/m². Después de su aplicación mostro buenos resultados durante 20 días.

Software Comet. Utilizado para medir si el uso de estos aditivos para la disminución de emisiones fue realmente efectivo. El software Comet es integrado a un equipo captador de polvo que a través de un láser hace detección de partículas y otro de los sistemas utiliza método gravimétrico. Los datos son descargados a través del software COMET obtenidos por captador de polvo y luego los resultados son analizados en Excel a través de datos estadísticos.

Aspectos relevantes del estudio:

Evaluados los efectos de contención de finos en diferentes horarios utilizando los productos melaza, hidróxido de magnesio, TGC. Cloruro de sodio, y bischofita, concluyeron que el producto bischofita dio mejores resultados en las áreas y vías que previamente que fueron tratadas con suelo y sal, pero se recomienda no aplicarlos en épocas de nieve porque genera vías más resbalosas.

Los productos fueron utilizados en taludes, vías de camiones, vías de equipos livianos, en los bancos y superficies de vías que fueron removidas con reeper de motoniveladoras y tractores, en las cuales se hizo la disolución en volumen logrando medir los días de duración del producto, demostrando que la melaza registro 16 días de duración, el hidróxido de magnesio no se pudo disolver, el TGC siete días y la Bischofita 21 días.

2.3.2. Predicción y análisis de la contribución de PM₁₀ desde pilas de Carbón en una Mina a Cielo Abierto.

Las áreas de almacenamiento de carbón son áreas de acopio de grandes volúmenes con el objetivo de obtener disponibilidad para inconvenientes que afectan las exportaciones de carbón. Las emisiones fugitivas afectan la calidad del aire y son influenciadas por los vientos, formas de apilamientos, topografías del área y su tasa de emisión es difícil contabilizarla. Las emisiones incluidas en este estudio incluyeron las actividades antrópicas de cargue, descargue y remanejo de carbón, al igual el tráfico de los camiones que circulan alrededor de las pilas.

Las emisiones de PM₁₀ se calcularon con los factores sugeridos por la EPA (1995).

El Calpuff es modelo gaussiano, no estacionario, que tiene la capacidad para tratar variables en el tiempo y espacio en fuentes de áreas y volúmenes. Los resultados obtenidos

demuestran que afectan las concentraciones de emisiones en áreas vecinas y contemplan actividades de cargue, descargue de carbón, tráfico de equipos y remanejo de carbón con tractores de Orugas. Para determinar las contribuciones de PM_{10} se midieron concentraciones durante 10 días de modelaje durante un mes en 5 receptores en una zona industrial minera ubicada en el norte de Colombia en actividades de almacenamiento de carbón. La modelación abarca una rejilla de 55 km x 45 km con celdas de 0.25^2 km y 10 niveles de altura. El campo de viento tridimensional se construyó a partir de datos de observaciones en superficie y en altitud utilizando el programa de procesador meteorológica Calmet, los datos meteorológicos en superficie fueron obtenidos de las estaciones la CDA y casitas calibrados con datos de dirección y velocidad de los vientos registrados en la estación La Mina perteneciente al IDEAM.

Las contribuciones diarias de PM_{10} por las actividades de almacenamiento de carbón fueron estudiadas en 5 receptores: Los Remedios (RD9), Papayal (RD11), Provincial (RD12), Barrancas (RD14) y Casitas (RD15) para determinar el aporte de PM_{10} por las pilas de carbón. El modelo se calibró con la información de la meteorología de la zona, mediciones de calidad del aire y la operación minera, simulando valores reales de los promedios diarios y mensuales de concentración, evaluándolos con un análisis estadístico para verificar la confiabilidad del modelo determinados por el método gravimétrico con muestreador de alto volumen con equipos Hi-Vol para Pm_{10} de la marca Tisch Enviroment modelo TE-6070 con filtros de cuarzo (Whatman tamaño de 8 por 10 pulgadas, tamaño de poro de 2 μm).

Aspectos relevantes del estudio:

Las concentraciones de PM_{10} fueron significativas y la modelación registro que el 14.50% de la concentración ambiental registradas en un caserío más cercano está influenciado directamente por las actividades de almacenamiento de carbón, pero para los municipios más apartados su influencia fue menor entre el 3 y 5%.

El Calpuff es una herramienta de simulación y estimación de las emisiones en las actividades mineras. Las contribuciones de PM_{10} por apilamientos de carbón son significativas y están relacionadas con la forma como se apila el carbón y la topografía del terreno. Durante las noches las emisiones son bajas pero las contribuciones en receptores son mayores, debido a la disminución de la altura de mezcla, menor velocidad de los vientos y estabilidad atmosférica asociada a la zona. Las emisiones aumentan por la velocidad de los vientos y algunas turbulencias

que son sensibles a la orientación de las pilas de almacenamiento. Se encontró que el aporte de emisiones está representado más o menos en un 14.50% de las concentraciones diarias en receptores viento abajo. Esta Simulación es confiable y permite identificar otras para almacenamiento y un mejor control en las emisiones.

En los estudios con esta herramienta mostro resultados consistentes en las zonas de almacenamiento de carbón de minas a cielo abierto donde represento un 11% de las emisiones totales del total del carbón extraído durante un año.

2.3.4 Modelación de la propagación de incendios de gran escala producidos por la combustión espontánea en los frentes de explotación en Minería de Carbón a cielo abierto y diseño de estrategias de apagado.

Los carbones son susceptibles a la autocombustión y normalmente en minas a cielo abierto los incendios son frecuentes en las paredes altas y en áreas que no se estén explotando, lo que genera emisiones de gases, inestabilidad geotécnica y problemas de salud. Estos incendios son espontáneos y con desencadenamiento de reacciones químicas más liberación de calor que ocurre durante la oxidación del carbón por exposición a condiciones atmosféricas por erosión y por las mismas prácticas de explotación desencadenando su propagación en los mantos de carbón.

Como métodos de mejora para el control y extinción de estos incendios se plantea como método alternativo PROPEX el cual para su aplicación requiere técnicas de enfriamientos. Antes de implementar esta tecnología se debe sofocar los incendios con tractores y adición de material estéril o aluvial hasta cubrirlo todo, dificultando el transporte de gases desde la atmosfera hasta el incendio. La remoción para extinguir incendios incipientes y de mediana magnitud se hacen con retroexcavadora de brazo largo para remover el material para luego enfriarlo con sustancia enfriadoras. Para detener la autocombustión se adiciona agua sobre el incendio.

La combustión del carbón no es predecible e involucra procesos de alta complejidad por lo que se hizo fundamental generar un modelo alimentado con variables fisicoquímicas y termodinámicas para predecir la combustión del carbón.

Para obtener la solución numérica del problema, fue esquematizado en numerosos programas computacionales con definición real del sistema a resolver, transformación de este

sistema en un modelo matemático, discretización a través de alguna técnica numérica y obtención de la solución aproximada (Courant, 1943).

Se desarrollaron dos simulaciones con el objetivo de observar la combustión completa e incompleta del carbón en escenarios de exceso y deficiencia de oxígeno, con simulaciones de transferencia de calor con aproximación en el incendio (etapa temprana de propagación) y con propagación en todo el manto de carbón (etapa avanzada de propagación) las cuales fueron soportadas bajo ecuaciones de conservaciones de la energía, de las especies y de la continuidad, obteniendo velocidades de propagación del fuego dependiendo del tipo de fisuras del macizo rocoso y del consumo volumétrico del carbón, los cuales nunca alcanzaron los 150 metros de profundidad porque no alcanzan a recibir suficiente incendio (Kuenzer et al., 2007).

Tomando como base las técnicas de Remoción, sofocación y enfriamiento, se complementó con el PROPEX que es una técnica a nivel mundial que se usa para controlar mega incendios de combustión espontánea del carbón que permite su extinción desde la superficie, aprovechando las estructuras geológicas y se trata de la inyección de una suspensión a presión suficiente para llegar a los incendios e invadir toda el área afectada, facilitando el flujo de la suspensión de la superficie hasta el incendio.

Aspectos relevantes del estudio:

El producto PROPEX compuesto por nanoclinker, sales de calcio carbónico y agentes espumante una vez aplicado evito la propagación y reactivación del incendio, demostrando que tiene capacidad para extinción de incendios de hasta 700°C generando una capa protectora que evita que el oxígeno entre en contacto con las paredes finales de la mina.

La propuesta técnica para Cerrejón para el control de los incendios debe continuar con la remoción con el sistema de aspersion de agua, sofocación con material estéril/aluvial y el sistema PROPEX con toda su instalación y montaje, siendo esta última, una nueva tecnología a nivel mundial planteada como propuesta de tesis.

2.3.5. Estudio comparativo de supresores de polvo Dasaut, DL10 plus y Knockout Dusply para la mitigación de material particulado en vías Yanacocha 2018.

Para este estudio se capitalizaron vías con materiales aprovechados para conformar la sub-base, base estructuralmente firme y una superficie de rodadura con un contenido de partículas muy finas limitado para evitar la formación de polvo.

Los supresores aplicados para la prueba fueron Dasaut que es un estabilizante y aglomerante de polvo fugitivo, el DL10 plus producido a partir de resinas vegetales con propiedades biodegradables la cual forma una mezcla que actúa como una microcapa y el Knockout dustply que es una solución biodegradable basadas en planta para el control del polvo.

Para la prueba se emplearon 3 camiones cisterna con una capacidad 9000 galones de agua y 4 camiones de 5000 galones de agua para el riego de áreas y vías a los cuales se les involucro áreas de operaciones en la mina, cargue, transporte, áreas de proyecto y áreas de geología. El Dasaut se hizo con un ratio de riego de 0,9 ml/m² y una adición de 37854,1 ml de supresor por cisterna, tiempo de degradación de 180 días y una reducción de material particulado de 88,9% y un 70% reducción de agua. El DL10 con una ratio de adición fue 1,2 ml/lit y un ratio de riego de 0,5 ml/m², una reducción de material particulado de 91,89% y una reducción del consumo de agua en 60%. El Knockout con ratio de adición de 118,2 ml/lit y ratio de riego de 56,0 ml/m², 100% biodegradable y una reducción de material particulado de 81,6% y 90% de consumo de agua.

Previo a la aplicación de los aditivos, la vía fue escarificada con motoniveladoras, se aplicó el aditivo mediante riego, batido y compactación del terreno. El estudio fue evaluado en campo tomando como base el polvo emitido por el paso de equipos mineros, derrape y emisiones de PM_{2,5} y PM₁₀ en el ambiente, con monitoreo detallado durante una semana.

Aspectos relevantes del estudio:

Los tres aditivos mostraron ser eficientes en el control de las emisiones y reducción en el consumo de agua, los diferencia el tema de costos, siendo el más costoso el Dasaut, seguido del DL10 y el más económico es el Knockout. Por ser viables los tres productos, la decisión está sujeto a las necesidades y comercialización con cada uno de los proveedores.

Se recomienda cumplir siempre el protocolo de aplicación, evitar remover el área tratada y cuando se haga mantenimiento programado a las vías, re-extender el material tratado para no

perder el las aplicaciones de supresor, capacitar a los operadores en el uso y su aplicación, regar 0.2 lt/m² del aditivo en una disolución de 1:40 (agua: aditivo) y tener en cuenta que el DI redujo en un 91.9% el material particulado, pero el Knockout dustply redujo un 90% pero en términos de costo es el más económico.

2.3.6. Estudio técnico – Económico del uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en la unidad minera Toquepala – Spcc.

Se realizaron pruebas con la mezcla explosiva Quantex 73 con el objetivo de determinar las ventajas que presenta este producto. Para el estudio se midió antes y durante la voladura parámetros como la densidad, velocidad de detonación y calidad del explosivo. Post voladura se analizó la fragmentación del material, presencia de humos y lo más importante el costo por voladura. Hecho el análisis se determinó que el producto tiene ventajas desde el punto de vista operativo y económico, con ahorros hasta del 20 %, con mejoras en la fragmentación, tasa de excavación de los equipos usados en la mina y mitigación de gases nitrosos. Con base en este estudio se implementó el uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en Toquepal (Sur del Perú, Provincia de Jorge Basadre, Departamento de Tacna).

El nitrato de amonio combinado con un combustible (derivados más volátiles del petróleo) produce el explosivo conocido como Anfo usado a nivel mundial y es una mezcla explosiva segura en la manipulación, bajo costo y alto rendimiento energético. La mezcla explosiva Quantex 73 (MEQ73) es compuesta por emulsión gasificada con Anfo Quantex (70/30) y un agente sensibilizador llamado nitrito de sodio con alta densidad que le aporta más energía durante la detonación. En el procedimiento de investigación para la recolección de datos se utilizó la herramienta DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) la cual se basa en una mejora continua a partir de recolección de datos, identificando primero el problema a mejorar, siguió la medición donde se elaboró la línea base con información histórica con pruebas de campo, para continuar con el análisis obtenido y para culminar con la implementación de las medidas de control. Para la medición se estableció cuatro parámetros de medición: Velocidad de detonación, densidad, fragmentación, tasa de excavación (Dif-Rate) y cálculo del balance de oxígeno del explosivo. Establecida la línea base con la información histórica que tiene el área de Perforación y Voladura, se procedió a realizar las pruebas con la emulsión gasificable con el componente de la mezcla explosiva Quantex 73 (MEQ73) para determinar sus cualidades y características.

Después de la voladura se realizó el análisis de fragmentación, usando el software WipFrag el cual realiza un foto-análisis en base a un punto referencial, realizando varios análisis para obtener una base de datos confiable, el análisis de la tasa excavación se realizó con el software Split Shovel Online, el cual mostro mejor resultados el MEQ73 que con el Anfo pesado.

Aspectos relevantes del estudio:

El porcentaje de gases nitrosos, se mitigaron considerablemente desde el uso de la MEQ73, debido a que el porcentaje de balance de oxígeno de la MEQ73 es menor a la de las mezclas de Anfo pesado, las cuales generaban gases nitrosos. Se obtuvo una disminución de fragmentación del 26 % y un ahorro del 0,024 \$/t.

Para las pruebas se hizo una línea base con la información histórica, pruebas para Anfo pesado a base de emulsión, información histórica de la fragmentación, tasa de excavación y balance de oxígeno en las mezclas de Anfo, evidenciando gases nitrosos o humos naranjas, los cuales son nocivos para la seguridad y el medio ambiente, caso contrario resultado de las pruebas de mezcla explosiva de Quantex 73 (MEQ73) donde se midió su densidad en laboratorio con mezcla de nitrito de sodio, tiempo de gasificación, velocidad de detonación, longitud de esponjamiento y por último se analizó la fragmentación para realizar una base de datos confiable demostrando que la mezcla explosiva Quantex 73 no evidencio gases nitrosos o humos naranjas.

2.3.7. Acciones de control y mitigación en CERREJON.

Por ser la generación del material particulado uno de los principales impactos en esta mina, se desarrollaron diferentes acciones de control en toda la operación que consistió en programas de manejo, monitoreo y control de las emisiones de polvo, que incluye riego en las vías de acarreo, sistemas de humectación del carbón, cañones de niebla, aspersores de agua y seguimiento de las partículas en tiempo real, tanto en Mina como en Puerto. Paralelo a estos controles se conformó un comité ambiental para capacitar las comunidades vecinas para que participen en las actividades de monitoreo de la calidad del aire, siendo prioridad identificar las fuentes de emisión que genera estas operaciones mineras para aplicar medidas estrictas de sistemas de control, con compromiso y conciencia ambiental para desarrollar una actividad minera que cumpla la normatividad.

Los métodos desarrollados se cuenta con: Desarrollo de planes mineros alimentados por dispersión de polvo, riego en vías de acarreo con flota de tanqueros de 20 Kgal y 10 Kgal de capacidad, uso de redes de aspersores para humectar áreas de cargue, uso de monitor de tanqueros como refuerzo al control de áreas durante episodios de altas emisiones, uso de cortinas de nieblas, conformadas por ocho cañones, uso de aspersores de alto flujo en patios de carbón, aplicación del sistema predictivo reactivo de calidad del aire, seguimiento detallado al uso de los controles operacionales con retroalimentación oportuna a la operación a través de operaciones de campo, sistemas de cámaras, estaciones de monitoreo y estaciones de monitoreo de PM_{10} y $PM_{2.5}$ y viento en tiempo real en el límite de las operaciones.

Aspectos relevantes del estudio:

La implementación de estas medidas contribuyó a registrar concentraciones de material respirable de PM_{10} y material particulado $PM_{2.5}$ al cierre del primer trimestre de 2018 que cumplieron los límites establecidos por la normatividad colombiana. Los resultados de todos los controles de la operación se reportan periódicamente a las Corporaciones y Ministerio de Ambiente y Desarrollo como cumplimiento de la resolución 2254 de 2017. El 26 de agosto de 2016 Corpoguajira genero una medida preventiva y suspendió temporalmente operaciones en el puerto mientras se estableció y se llevó a cabo un plan de mitigación por Corpoguajira que incremento controles de material particulado en el puerto. El 30 de agosto se levantó la suspensión por parte de Corpoguajira previa verificación de los sitios señalizados en la medida.

La identificación y evaluación oportuna de los aspectos e impactos ambientales han logrado implementación, prevención y mitigación unidos a sistemas de monitoreo, seguimiento de los sistemas de control y cumplimiento de la normatividad colombiana, reduciendo los niveles de emisión de partículas en un 36% por debajo de los límites máximos permitidos por la normatividad colombiana. Las medidas de control de material particulado han mostrado ser eficientes y nos arrojan valores diarios en los índices de calidad del aire en todas las estaciones de monitoreo niveles en colores no preocupantes garantizando concentraciones por debajo de los límites legales.

3. METODOLOGIA

Para lograr el cumplimiento del objetivo general identificado para la monografía, se definieron tres objetivos específicos, de manera tal que se pueda cumplir de forma clara y organizada con el objetivo general planteado que es, el de establecer estrategias que permitan prevenir, controlar y mitigar las emisiones de material particulado que se puedan generar en las diferentes actividades del proceso de extracción de carbón en minería a cielo abierto.

Para lograr cumplir con lo establecido en el primer objetivo específico que consiste en Identificar las actividades derivadas del proceso de extracción de carbón a cielo abierto que generan emisiones de material particulado a la atmosfera, se contempla como primera actividad realizar una búsqueda bibliográfica de las alternativas de control y mitigación de emisiones de material particulado en la explotación de carbón en Minería a cielo Abierto, aspectos fundamentales de la investigación tales como alternativas que nos ayuden a realizar esta actividad de manera responsable y en armonía con el medio ambiente, asegurando que el aire que ingresa en la operación minera salga con las concentraciones finales de acuerdo a la normatividad vigente, que las variables operacionales del proceso deben estar controladas, que las características de calidad del aire sean monitoreados durante todos los procesos, entre otros aspectos relevantes; información que será utilizada para evaluar las alternativas de prevención, control y mitigación de las emisiones, que de acuerdo con la información recopilada, han sido estudiadas hasta el momento y que pueden ser aplicadas en los procesos de control. Seguidamente, de una forma más puntual, se establecerán las ventajas y desventajas de estas alternativas de Control; información que será importante y de gran utilidad para el cumplimiento del objetivo específico dos y del objetivo general.

Para cumplir con lo establecido en el segundo objetivo específico que es clasificar las actividades en orden de aporte de emisiones de material particulado a la atmosfera., como primera actividad y complemento de las actividades planteadas anteriormente, se realizará una revisión detallada de todas las acciones que se realizan; para luego definir y evaluar de acuerdo a la información recopilada, los métodos más eficaces y efectivos, que se deben implementar en cada una de las alternativas para prevenir, controlar y mitigar las emisiones de material particulado en minas a cielo abierto.

En cuanto al cumplimiento del tercer y último objetivo específico definido, el cual consiste en determinar las medidas más eficientes de prevención, control y mitigación de material particulado en un proyecto de minería de carbón a cielo abierto, de la información recopilada en la primera actividad, se realizará una revisión de las variables operacionales y su incidencia directa en los diferentes métodos utilizados para el control de emisiones.

Como última actividad y para cumplir con el objetivo general del proceso de identificar las actividades derivadas del proceso de extracción de carbón a cielo abierto que generan emisiones de material particulado a la atmosfera, se contempla realizar un paralelo con las alternativas de tratamiento estudiadas, en donde se resumirán las ventajas, desventajas, costos, variables operacionales y características de calidad de aire que pueden verse afectadas, entre otros aspectos que pueden ser relevantes y que permitan seleccionar la mejor alternativa de control y mitigación de emisiones de material particulado que puede implementarse en un proceso de control y mitigación con un tratamiento convencional.

3.1 Identificación de fuentes de emisión en el proceso de extracción del carbón.

Las actividades identificadas que más generan emisiones de material particulado en el proceso extractivo del carbón son generadas por la remoción de grandes cantidades de estéril para destapar el depósito mineral y se requiere el uso de excavadoras frontales y retroexcavadoras, camiones para transporte, cargadores, apilamientos del mineral, bandas transportadoras, etc.

En su orden las actividades mineras que más generan impactos al medio ambiente se clasifican de acuerdo al ciclo de explotación del mineral e involucra las siguientes operaciones:

- Manejo de suelos: Integra el descapote, su transporte y descarga.
- Perforación y voladuras del material estéril: Todo los avances y desarrollo de la mina requieren fragmentar el material para su remoción.
- Manejo de Materiales que incluyen la carga, el transporte y la disposición del material mineral, suelo y estéril.
- Mantenimiento de vías no consolidadas.
- Tráfico de vehículos: Corresponde a las vías internas y externas donde transitan los equipos mineros a gran escala, medianos y de soporte.

- autocombustión y erosión eólica, originadas por las áreas expuestas tales como el estéril volado, exposición del carbón al medio ambiente y pilas de acopio.

Las fuentes de mayor impacto son las del proceso de voladuras y las fuentes fugitivas que provienen por el transporte de material estéril que se hace en carreteras consolidadas sin pavimentar, trituración y por almacenamiento de carbón. Las emisiones de polvo generadas por las actividades realizadas en el interior de la mina por la explotación minera, también generan diferentes fuentes de emisión las cuales son caracterizadas de acuerdo a la actividad que corresponde al cargue de material con palas frontales, retroexcavadoras y cargadores.

Las consideraciones ambientales de prevención, control y mitigación de material particulado implementadas en diferentes zonas mineras son exitosas si se hace una previsión y prevención de las emisiones que se generan en el proceso minero, las cuales inician con un programa de monitoreo acompañadas con las siguientes medidas, las cuales nos ofrecen soluciones y han sido exitosas en su implementación:

- Productos para el control de polvo ambiental en vías de minas a cielo abierto.
- Predicción y análisis de la contribución de PM_{10} en las áreas de almacenamiento de carbón.
- Modelación de la propagación de incendios de gran escala producidos por la combustión espontánea en los frentes de explotación.
- Uso de supresores de polvo Dasaut, DL10 plus y Knockout dusply para la mitigación de material particulado.
- Uso de la mezcla explosiva Quantex 73 para la mitigación de gases nitrosos en el proceso de voladuras.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Los supresores de polvo por sus características contribuyen a un efectivo control de las emisiones derivadas por las actividades de la Minería a cielo abierto. En la revisión bibliográfica encontramos que el producto Bischofita que inicialmente perdió eficiencia porque realizaron un riego con agua excesiva que combinada con la circulación de los camiones destruyó la capa o malla protectora que se había construido; el estudio también mostro que el uso de Bischofita aplicado después de tratar las vías con suelo-sal al nevar mostro mejores condiciones dos días después de aplicado y no hubo acumulación de nieve. El inconveniente de esta mezcla son los trabajos alternos que restringe el tráfico en las vías y ocasiona derrape de los equipos que por allí transitan. Pero resultó ser un producto confiable y duradero.

Resumen de las aplicaciones realizadas con melaza, TGC, hidróxido de magnesio y bischofita.

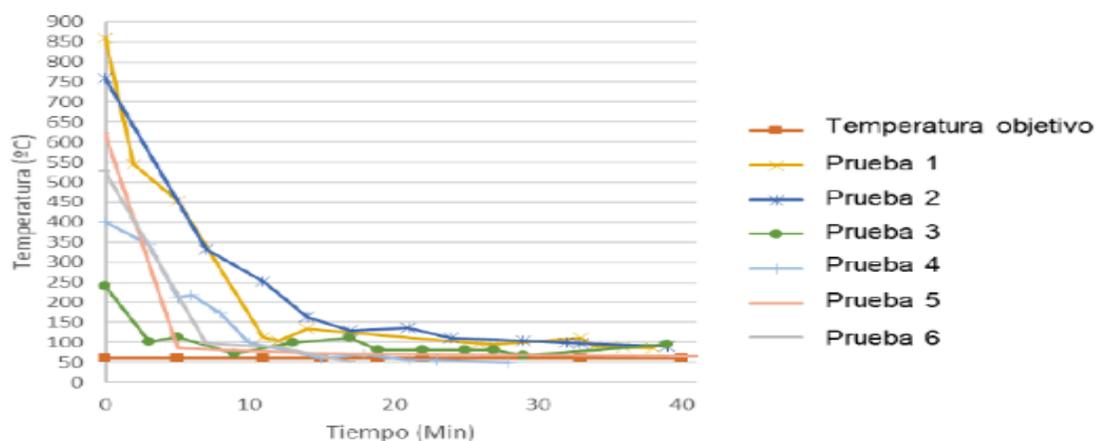
Producto	Fecha de prueba	Zona de prueba	Dilución	Observaciones
MELAZA	18/10/2013	Taludes	14 % en volumen	16 días de duración
	15/04/2014	Camino de camiones	40 % en volumen	2 - 3 días
	20/05/2014	Camino de vehículos livianos	40 % en volumen	10 días
	22/10/2014	Superficie del banco 4610, sin circulación	35 % en volumen	más de 16 días
	28/12/2014	Talud de un botadero cerrado	30 % en volumen	más de 60 días
	21/02/2015	Superficie rípiada	35 % en volumen	más de 16 días
HIDROXIDO DE MAGNESIO	23/11/2013	Prueba de disolución de 400 cm ³ en 2 l de agua	20 % en volumen	No se pudo disolver
	25/11/2013	Prueba de disolución de 200 cm ³ en 2 l de agua	10 % en volumen	No se pudo disolver
	25/11/2013	Prueba de disolución de 4 000 cm ³ en 15 l de agua y prueba de aplicación sobre superficie	27 % en volumen	No se pudo disolver y no generó costra ni consolidó la superficie
	26/11/2013	Prueba de disolución de 200 cm ³ y 400 cm ³ en 2 l de agua caliente	10 % y 20 % en volumen	No se pudo disolver
TGC	06/11/2013	Botadero Pampa del Rulo	3 %	7 días
BISCHOFITA	26/09/2013	CL 1 - CL 2 (circulación de camiones)	1,2 g/cm ³	20 días
	05/11/2013	Camino de camiones	1,2 g/cm ³	12 días
	16/11/2013	Camino de vehículos livianos	1,2 g/cm ³	21 días

(Brauer, Giubergia, & Gil-Costa, 2019)

Los modelos de dispersión matemática nos brindan información que nos ayudan a prevenir las emisiones y concentraciones de partículas generadas por las actividades mineras con un programa paralelo lleva a cabo un programa de vigilancia y monitoreo de la calidad del aire con el objetivo con el fin de verificar que tan eficiente son las medidas de mitigación y prevención implementadas. Las emisiones fugitivas afectan la calidad y debido a su naturaleza no es fácil cuantificarla porque estas emisiones están asociadas a factores como los vientos, formas como se apila el carbón, tráfico, combustiones y turbulencias generadas en la superficie del material (Mueller et al., 2015a). El modelo Calpuff es una herramienta de simulación y estimación de las emisiones en las actividades mineras que tiene la propiedad de tratar variables en tiempo y espacio proporcionando resultados confiables y predice las contribuciones de PM_{10} en los receptores seleccionados con una capacidad aceptable de predecir concentraciones de una zona utilizando factores de emisión publicados por la EPA mostrando que es aplicable en cualquier lugar donde se evalúen origen o relaciones de enfermedades de salud pública.

En los mega incendios que se generan por combustión espontánea en los mantos de carbón ya expuestos; el PROPEX es una técnica que se usa a nivel mundial y permite su extinción aprovechando las estructuras geológicas y cavernas producidas por la ceniza de combustión desarrollando una fuerte cobertura y asfixia para la zona afectada por incendio. Esta técnica consiste en la inyección de una suspensión a presión que fue suficiente para llegar al incendio e invadir las áreas afectadas a través de tuberías que se introducen en los pozos perforados donde se acumula la espuma formando una barrera que impide la propagación del incendio en el manto de carbón y evita que se genere transferencia de calor a través del manto posterior a la zona intervenida.

Distribución de temperaturas durante el tiempo de aplicación del PROPEX:



(Baena & Rua, 2018)

Los supresores de polvo Dasaut que es un estabilizante y aglomerante de polvo fugitivo, el DI10 plus producido a partir de resinas vegetales con propiedades biodegradables la cual forma una mezcla que actúa como una microcapa y el Knockout dustply que es una solución biodegradable basadas en planta para el control del polvo, son tres productos derivados de productos orgánicos y fueron aplicados en áreas estratégicas donde hay más emisiones de material particulado los cuales mostraron eficiencias en las ratios de adición y de riego reduciendo en un 70% de consumo de agua y una reducción de material particulado del 91.89% sin afectación al medio ambiente por ser biodegradable.

Cuadro comparativo % reducción de agua con los tres supresores									
Tipo de aplicación	Longitud (m)	Ancho promedio (m)	Total, área (m ²)	Agua utilizada para mitigar el impacto (Lts/riego)	Nº de riegos/día	Total, agua utilizada para mitigar el impacto (Lts/día)	Total, agua utilizada para mitigar el impacto (Lts/al mes y medio)	Total, agua utilizada para mitigar el impacto (Lts/año)	% Optimización consumo de agua
Agua + dasaut (0,2% v/v)	1000	8	8000	18927.1	3	11356.2	511030.6	4088245.0	-70
Agua + dl10 plus (0,1% v/v)	1000	8	8000	18927.1	4	15141.6	681374.2	5450993.3	-60
Agua + knockout dustply (10.6% v/v)	1000	8	8000	18927.1	1	3785.4	3785.4	30283.3	-90

(Pereda, Miki, & Alaay, 2018)

En las voladuras que se realizan con explosivos como el Anfo pesado (Usado en la mayoría de las minas a nivel mundial) no tienen un balance de oxígeno adecuado lo que genera los humos naranjas, mientras que la mezcla explosiva Quantex 73 está compuesta por emulsión gasificada que al sensibilizarse con el nitrito de sodio ofreció un balance de oxígeno adecuado que mitigo la emisión de humos naranjas y menos probabilidad de generación de gases nitrosos con una disminución hasta del 28% en el periodo de pruebas y cuando se utilizó en su totalidad genero una disminución de hasta un 1% en generación de gases nitrosos. En temas económicos hubo un ahorro de costos del 10% de tonelada de material fragmentado por menor uso de explosivos logrando mejores resultados operativos, medioambientales, de seguridad y económicos, mitigando significativamente la generación de humos nitrosos, que generaban demoras operativas y eran un riesgo para los trabajadores incidiendo en mejores prácticas medio ambientales y de seguridad.

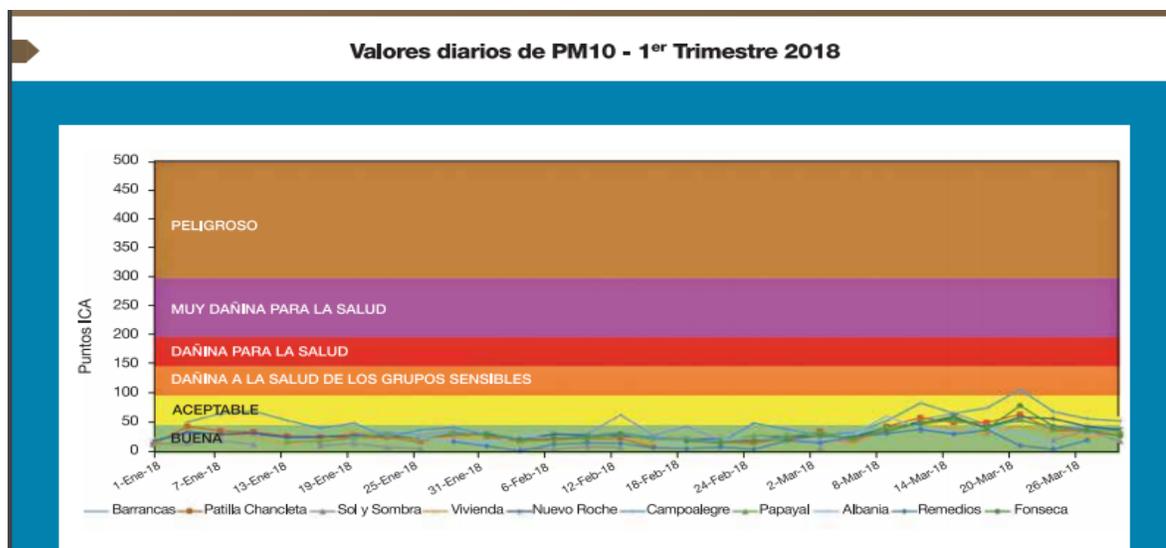
Tipo de Explosivo	No hubo Gases	Se Generó Gases Nitrosos			N° de Disparos
	Nitrosos	Puntual	Regular	En exceso	
Heavy ANFO	11	35	40	26	112
MEG 73	464	143	108	25	740

Fuente: Departamento de Perforación y Voladura Mina Cuajone

(Ilallacachi & Jesus, s.f.)

El complejo Carbonífero Cerrejón tiene establecido un programa de manejo, monitoreo y control de las emisiones de polvo, que no solo incluye el riego de vías, sino, sistemas de humectación, cañones de niebla, aspersores de gua y un seguimiento estricto de las concentraciones de material particulado en tiempo real en la Mina y en el Puerto.

Como se muestra en el grafico ninguna de las estaciones presentan niveles por encima de la norma establecida en partículas igual o menor a 10 micras (PM₁₀) son aquellas que pueden pasar de la atmosfera ser inhaladas por el ser humano. Podemos concluir que el riesgo de afección a la comunidad está controlado porque que el índice de inmisión de las estaciones de monitoreo muestra concentraciones promedio entre 25 y 40 µg/m³ y no han sobrepasado el límite máximo permisible de 50 µg/m³ producto de las medidas de mitigación como el riego y humectación en todas las áreas y manejo de carbón.



Fuente: www.Cerrejón.com/ Informe de calidad del aire. La Mina 2018

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El producto Bischofita como supresor de polvo mostró resultados positivos en todas las áreas y zonas de la mina donde se aplicó alcanzando en las vías que es donde más se genera emisiones, controles importantes desde el punto de vista de control de polvo y de disminución en el consumo de agua, mostrando resultados de control durante 20 días.

El cloruro de sodio, ClNa aseguro buena humedad y buen agarre de las llantas, pero para garantizar su eficacia hubo que adicionarle al regado bischofita. El TGC se descartó y solo se hizo una sola prueba porque la costra que generaba, aunque controlo el polvo era poco resistente a los impactos y los movimientos que se generados por las voladuras y circulación de equipos.

El hidróxido de Magnesio en la prueba no evidencio formación de costra y se decidió no usarlo. La melaza aglomero partículas generadas hasta por 16 días y la costra resistió las ondas expansivas de las voladuras y caída de nieve, comprobando también que utilizando melaza en volumen del 40% retardó en 2 y 3 días en vías lo que genera un alto consumo del producto.

La bischofita tiene eficiencia y más durabilidad en las vías mineras en periodos que no exista nieve por el tema del derrape de los equipos, que para esos casos se puede usar melaza y luego continuar con la bischofita.

Las condiciones meteorológicas, formas de las pilas y la misma topografía del terreno influyen en las emisiones generadas en las áreas de almacenamiento de carbón por eso el Calpuff, es una herramienta preventiva que simula la distribución y concentración de contaminantes y partículas en el aire para caracterizar el área de influencia y su relación con las comunidades vecinas para poder evaluar su afectación en la calidad del aire. Las emisiones fugitivas afectan la calidad y debido a su naturaleza no es fácil cuantificarla porque estas emisiones están asociadas a factores como los vientos, formas como se apila el carbón, trafico, combustiones y turbulencias generadas en la superficie del material (Mueller et al., 2015a).

El PROPEX es una técnica que se usa a nivel mundial para control de mega incendios generados por combustión espontánea del carbón que permite la extinción aprovechando las estructuras geológicas y cavernas producidas por la ceniza de combustión desarrollando una fuerte cobertura y asfixia para la zona afectada por incendio. Los resultados de simulación desarrollada

con el software COMSOL demostró la evidencia que la espuma sirve como barrera para disminuir la transferencia de calor en el medio logrando un sofocamiento del incendio.

Para control de Emisiones con un uso racional de agua el producto Knockout dusply redujo el material particulado en un 81,6% y un 90% el consumo de agua sin efectos negativos en el ambiente y reducción en los impactos ambientales. En el estudio los tres aditivos mostraron ser eficientes en el control de las emisiones y reducción en el consumo de agua, los diferencia el tema de costos, siendo el más costoso el Desaut, seguido del D110 y el más económico es el Knockout. Por ser viables los tres productos, la decisión está sujeto a las necesidades y comercialización con cada uno de los proveedores. Los tres productos son de gran ayuda para las empresas mineras con problemas de emisiones de material particulado, los cuales demostraron minimización en el uso del agua y control de las emisiones. La evaluación técnica-económica de estos supresores comprobó que el Desaut tiene un costo de 680,6 \$/día, 30626,3 \$/mes y 245010,2 \$/año en un Km. El D110 plus, 3\$/día, 28589,9 \$/mes y 228719,5 \$/año en un Km y el Knockout dusply con un costo de 2803,8 \$/día en un Km, 14267,4 \$/mes y 114139,5 \$/año. Se comprobó que los tres productos son factibles por sus resultados similares siendo de menor costo y de mejor resultado el Knockout dusply que redujo el material particulado en un 81,6% y un 90% el consumo de agua sin efectos negativos en el ambiente y reducción en los impactos ambientales.

La mezcla explosiva Quantex 73 está compuesta por emulsión gasificada que al sensibilizarse con el nitrito de sodio género burbujas de gas de nitrógeno y ofreció un balance de oxígeno adecuado que mitigo la emisión de humos naranjas y mitigo la probabilidad de generación de gases nitrosos con una disminución hasta del 28% en el periodo de pruebas. Cuando se utilizó en su totalidad genero una disminución de hasta un 1% en generación de gases nitrosos. La mezcla explosiva Quantex 73 no evidencio gases nitrosos o humos naranjas. En temas económicos hubo un ahorro de costos del 10% de tonelada de material fragmentado por menor uso de explosivos logrando mejores resultados operativos, medioambientales, de seguridad y económicos, mitigando significativamente la generación de humos nitrosos, que generaban demoras operativas y eran un riesgo para los trabajadores incidiendo en mejores prácticas medio ambientales y de seguridad.

Las acciones de control de CERREJON han logrado concentraciones promedio de material particulado entre 25 y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y no han sobrepasado el límite permisible de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ producto de las medidas de mitigación como el riego y la humectación en todas las áreas y manejo de carbón.

Por ser la generación del material particulado uno de los principales impactos en esta mina, se desarrollaron diferentes acciones de control en toda la operación que consistió en programas de manejo, monitoreo y control de emisiones de polvo, que incluyo riego en las vías de acarreo, sistemas de humectación del carbón, cañones de niebla, aspersores de agua y seguimiento de las partículas en tiempo real, tanto en Mina como en Puerto.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] “Soluciones de Voladura en la Minería del Carbón: Fundación Maxam”. Enero de 2017.
http://www.maxam.net/es/fundación/catedra_maxam_soluciones_voladura/minería_carbon
- [2] José I. Huertas, María E. Huertas, Sebastián Izquierdo D. Enrique D. Gonzalez, Air Quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia
- [3] Original Journal Of Environmental Management, Volume 93, Issue 1, January 2012, Pages 121-129
- [4] Angulo, Luis; Huertas, José I.; Gloria M.; Caracterización de partículas suspendidas (PST) y partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carboníferas a Cielo Abierto, información tecnológica, 2011, Pages 23-34
- [5] Carlos Ordoñez, Sánchez; Reinoso-Valladares Garcés; Canciano Fernández, Janet; Aplicación de modelos Simplificados para la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Caso de estudio. Revista Cubana de Química, Volumen 30, 2018, Pagina 90-103
- [6] Cerrejón, Informe de Gestión de Calidad del aire, 2016
- [7] Marleny López, Lina Sánchez, Luz López Sánchez, Mary Medina, Graciela Salazar; La prevención y mitigación de los riesgos de los países ambientales mineros (PAM) en Colombia: Una Propuesta Metodológica. Revista Entramado. Volumen 13, junio 2018. Página 78-91
- [8]” Soluciones de Voladura en la Minería del Carbón: Fundación Maxam”. Enero de 2017.
http://www.maxam.net/es/fundación/catedra_maxam_soluciones_voladura/minería_carbon.
- [9] José I. Huertas, María E. Huertas, Sebastián Izquierdo D. Enrique D. Gonzalez, Air Quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. Original Journal Of Environmental Management, Volume 93, Issue 1, January 2012, Pages 121-129
- [10] Angulo, Luis; Huertas, José I.; Gloria M.; Caracterización de partículas suspendidas (PST) y partículas Respirables (PM10) producidas en Áreas de Explotación Carboníferas a Cielo Abierto, información tecnológica, 2011, Pages 23-34

[11] Carlos Ordoñez, Sánchez; Reinos-Valladares Garcés; Canciano Fernández, Janet; Aplicación de modelos Simplificados para la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Caso de estudio. Revista Cubana de Química, Volumen 30, 2018, Pagina 90-103

[12] Cerrejón, Informe de Gestión de Calidad del aire, 2016

[13] Elian David Alvis Camacho; Impacto Ambiental Generado por el material particulado, sobre la calidad del aire en la zona de influencia de los proyectos carboníferos del Departamento del Cesar, Tesis de Grado, marzo 2012

[14] Ángel Macias, Mauricio Alberto; Cooperación técnico-científica internacional en la construcción de redes de monitoreo atmosférico. El caso de Bogotá (1960-2016), Artículo letras verdes, mar-ago2019, Issue 25, p143-167. 25p.

[15] Arrieta fuentes, Álvaro Javier; Dispersión de Material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Revista de Ingeniería, investigación y Desarrollo, Vol. 16 No.2, Julio-diciembre de 2016, pp 43-54

[16] Mendoza Daza, Alfonso David, Prevención y control de autocombustión del carbón in situ en la mina Carbones del Cerrejón Limited. Trabajo de grado 2011

[17] Minería y Geología, Versión On-line ISSN 1993-8012, Vol. 35. Abr-junio 2019

[18] K. Akaokaa, I. McKendryb, J. Saxtonc. P.w. Cottle. Impacto f coal-carrying trains on particulate matter concentrations in South Delta, British Columbia, Canada. Enviromental Pollution, Vol. 223, April 2017, Pages 376-383

[19] Cogliati, M. G. Estimación de Emisiones en Minería a cielo abierto. October 2016.
https://www.researchgate.net/publication/311196588_ESTIMACION_DE_EMISIONES_EN_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO_Estimation_of_emissions_from_the_opencast_mining

[20] Pablo Bustamante-Baena, A. J.-R. (Octubre de 2018).
https://www.researchgate.net/publication/328125878_MODELACION_DE_LA_PROPAGACION_DE_INCENDIOS_DE_CARBON_A_GRAN_ESCALA_PRODUCIDOS_POR_LA_COMBUSTION_ESPONTANEA_EN_LOS_FRENTES_DE_EXPLORACION_EN_MINERIA_DE_CARBON_A_CIELO_ABIERTO_Y_DISENO_DE ESTRATEGIAS_DE PARA_EL_CIERRE_DE_MINAS.