

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MATERIAL PARTICULADO EN LA  
ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA.

ANTONIO ALEJANDRO ACOSTA GÓMEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO BOGOTÁ  
FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL

2020

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MATERIAL PARTICULADO EN LA  
ZONA MINERA DEL DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA.

ANTONIO ALEJANDRO ACOSTA GÓMEZ

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

DIRECTOR  
INGENIERO LUIS ECHEVERRY B.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO BOGOTÁ  
FACULTAD INGENIERÍA AMBIENTAL

2020

## Tabla de Contenidos

Resumen	7
Abstract	7
1. Introducción	8
2. Formulación y planteamiento del problema	11
3. Objetivos	13
3.1 Objetivo General	13
3.2 Objetivo Específico	13
4. Marco Teórico	13
4.1 Marco Geográfico.	16
4.2 Explotación del Carbón	17
4.3 Fuentes de Contaminación atmosférica.	20
4.4 Tipos de contaminantes en el aire	22
4.5 Contaminación del aire por material Particulado.	23
4.6 Transporte y dispersión de contaminantes en el aire	25
4.7 Sistemas de información geográfica SIG	26
4.8 Calidad del aire en la Guajira.	26
5. Estado de conocimiento	30
5.1 Experiencias internacionales	30
5.2 Experiencias nacionales	32
5.3 Experiencias Locales	33
6. Metodología	34
6.1 Zona de Estudio	34
6.4 Aspectos Históricos.	36
6.5 Fuente de la información.	37
6.6 Preparación de la información.	38
6.7 Análisis Estadístico	39
7.1 Descripción de las variables meteorológicas	43
7.2 Análisis espacial	55
8. Discusión	60
9. Conclusiones	63
8. Lista de referencias	65

## Lista de Tablas

Tabla 5. Características del Marco Geográfico del departamento de La Guajira Fuente: Informe departamental minero GUAJIRA 2017)	16
Tabla 1. Clasificación de los contaminantes atmosféricos y su influencia en el medio ambiente. Fuente: Adaptada de (Oyarzun, 2010).	24
Tabla 2. coordenadas de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de CORPOGUAJIRA FUENTE; informe mensual de la calidad del aire en la guajira.	27
Tabla 3. Representación promedio del material particulado PM10, evaluado la norma 2254 del 2017. Fuente (Ministerio de Ambiente)	28
Tabla 4. Marco normativo de la minería. Fuente ANLA	29
Tabla 6. Localización y evaluación de la red meteorológica de la Baja Guajira utilizada en esta investigación. (Ambiental, 2019)	37
Tabla 7. Diagrama de la metodología implementada. Fuente propia	38
Tabla 8. Análisis anual promedio del PM <sub>10</sub> con base a las estaciones por año Fuente: IDEAM	42
Tabla 9. Análisis del consolidado de las variaciones meteorológicas en la zona minera con base a las estaciones por año Fuente: IDEAM.	44
Tabla 10. Análisis anual estadístico del PM10 con base a las estaciones. Fuente: IDEAM46	
Tabla 11. Análisis estadístico descriptivo. Fuente Autor.	58

## Tabla de figuras

Figura 1. Localización de la mina del Cerrejón con sus estaciones de monitoreo en la Guajira. Fuente: Google Earth.	36
Figura 2. Comportamiento de la precipitación en la Guajira. Fuente: Weather Spark; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
Figura 3. Comportamiento espacial del material particulado PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período 2013 y 2014. Fuente propia	54
Figura 4. Comportamiento espacial del material particulado PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período 2015 y 2016. Fuente propia	55
Figura 5. Comportamiento espacial del material particulado PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período 2017 y 2018. Fuente propia	56
Figura 6. Comportamiento espacial del material particulado PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el período 2019. Fuente propia	57

## Lista de gráficas

Gráfica 1. Distribución poblacional del departamento de la guajira, Fuente: (Sostenible O. d., 2019)	16
Gráfica 2. Distribución de poblaciones étnicas en el departamento de la guajira, Fuente: (Sostenible O. d., 2019)	16
Gráfica 3. Comportamiento de la dirección del viento. Fuente WRPLOT View-Genera Rosa de los vientos-IDEAM, SISAIRE 2013 al 2016	39
Gráfica 4. Comportamiento de la precipitación en la Guajira. Fuente: IDEAM	40
Gráfica 5. Comportamiento en las estaciones de monitoreo PM <sub>10</sub> , período 2013 al 2019.	43
Gráfica 6. Análisis estadístico del PM <sub>10</sub> con las regalías en el período 2013 al 2019. Fuente El Cerrejón	44
Gráfica 7. Análisis estadístico de la estación de Albania del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE	47
Gráfica 8. Análisis estadístico de la estación de Barrancas del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE	47
Gráfica 9. Análisis estadístico de la estación de Cuestecitas del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE	48
Gráfica 10. Análisis estadístico de la estación de Hato Nuevo del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE.	49
Gráfica 11. Análisis estadístico de la estación de Los Remedios del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE.	49
Gráfica 12. Análisis estadístico de la estación de Pacharooca del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE.	50
Gráfica 13. Análisis estadístico de la estación de Papayal del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE.	51
Gráfica 14. Análisis estadístico de la estación de Provincial del PM <sub>10</sub> en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE.	51

## Resumen

Se realizó el estudio del comportamiento de la distribución espacial del material particulado (PM<sub>10</sub>), durante el periodo comprendido entre 2013 y 2019, en la zona carbonífera de las 8 estaciones de la baja Guajira ubicada en el noreste de Colombia. Los resultados indicaron las concentraciones máximas del (PM<sub>10</sub>) de la siguiente manera, 123.60 µgm<sup>3</sup>, 100.60 µgm<sup>3</sup>, 95.60 µgm<sup>3</sup>, 75.22 µgm<sup>3</sup>, 64.03 µgm<sup>3</sup>, registradas en los periodos evaluados. Se observaron las condiciones meteorológicas que están asociados con los valores máximos de (PM<sub>10</sub>) estas fueron; precipitaciones de 106.20 mm, velocidades de viento superiores a 1.91 m/s, con una dirección del viento (NNE-NEE). El desarrollo del análisis espacial y estadístico permite identificar la relación directa de las variables meteorológicas con las generaciones de las operaciones mineras a cielo abierto.

**Palabras Clave;** minería a cielo abierto; material particulado; concentraciones, análisis estadístico y espacial; variables meteorológicas

## Abstract

The study of the behavior of the spatial distribution of the particulate material was carried out (PM<sub>10</sub>), during the period from 2013 to 2019, in the carboniferous zone of the 8 stations of the Baja Guajira located in the northeast of Colombia. The results indicated the maximum concentrations of (PM<sub>10</sub>) as follows: 123.60 µgm<sup>3</sup>, 100.60 µgm<sup>3</sup>, 95.60 µgm<sup>3</sup>, 75.22 µgm<sup>3</sup>, 64.03 µgm<sup>3</sup>, registered in the evaluated periods. The meteorological conditions associated with the maximum values of (PM<sub>10</sub>) were observed as follows: rainfall of 106.20 mm, wind speeds greater than 1.91 m/s, with one wind direction (NNE-NEE). The development of spatial and statistical analysis allows us to identify the direct relationship of the meteorological variables with the generations of open pit mining operations.

Keywords; opencast mining; particulate matter; concentrations, statistical and spatial analysis; meteorological variables.

## 1. Introducción

El desarrollo de este trabajo de investigación está enfocado en la supervisión y la identificación de la contaminación atmosférica en donde se desarrollará el seguimiento de las emisiones atmosféricas, por ende ha indicado que día a día hay una considerable importancia, según las cifras de la OMS “Organización Mundial de la Salud”, para lo cual afirma que *“una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire”* (OMS, 2014).

En Colombia, conforme a investigaciones desarrolladas por el Departamento Nacional de Planeación el cual indica que se estimó y determino que, durante el año del 2015, *“los impactos del desarrollo de esta actividad están asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades”*. (Planeación, 2019).

Adicionalmente, los costos ambientales generados por la contaminación atmosférica en el país durante los últimos años se incrementaron como lo evidencia el estudio del IDEAM. pasando de 1,1% del PIB de 2009 (\$5,7 billones de pesos) a 1,59% del PIB de 2014 (\$12 billones de pesos) y del 1,93% del PIB en 2015 (\$15.4 billones de pesos) (sostenible, 2015), lo cual pone en evidencia la necesidad de seguir implementando estrategias de normas ambientales para identificar la evaluación y el monitoreo constante de estas sustancias. (IDEAM, 2014)

La contaminación atmosférica puede presentarse de carácter global, regional y local. Esto va a depender de un proceso denominado “deposición atmosférica”, correspondiente a la masa total de contaminante transferida desde la atmósfera a la superficie en un área determinada (suelo, agua) con períodos de retorno. (Cazorla, 2014).

Colombia es un país privilegiado por su diversidad de fauna y flora así mismo por su diversidad ecológica, actualmente los países con mayores reservas mineras de carbón, siendo el quinto país a nivel Latinoamérica con 746,29 (Ha) a lo que 117 se presentan con títulos en exploración equivalente a 630,965 (Ha) (Minera, 2017); Este recurso por tener características como; su bajo contenido de azufre, cenizas y humedad, lo representa como

un producto de mejor calidad a nivel mundial ocasionando grandes impactos positivos en la economía del país, por el alto volumen de exportación; pero el desarrollo de esta actividad repercute en la formación de impactos negativos, causando el deterioro en los ecosistemas como la pérdida de fertilidad de los suelos, la contaminación en fuentes hídricas (Mosquera , Cabrera , & Rodríguez, 2016) ; así mismo la minería se considera una de las acciones más contaminantes en cada proceso de producción y están relacionada con la extracción, el transporte y el uso de este material, origina un impacto negativo hacia el medio ambiente, generando afectaciones de la salud en la comunidad afectando la ecología y la integridad global, ya que los componentes químicos de alta densidad empleados para los métodos de extracción y explotación de las labores mineras, llegan a ser peligrosas por el tiempo que se lleve expuesto el proyecto.

Con base al análisis realizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el departamento de Guajira referente a la contaminación atmosférica, es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación, de acuerdo con lo establecido (Sostenible M. D., 2020), en el *Título 5 del Decreto 1076 de 2015* y ajustando la definición, “*la Contaminación Atmosférica es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes, entendidos estos como fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas*” , en el desarrollo con base a la extracción minera a cielo abierto, el manejo de pesticidas, la quema de combustibles, la industrialización y la deforestación, las emisiones generadas por el tráfico vehicular y su vez clasificados en la atmósfera como; (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), que son emitidos directamente a la atmósfera por medio de fuentes de los contaminantes. Estos contaminantes se denominan contaminantes primarios y, dependiendo de los procesos que tengan lugar en la atmósfera, como su dispersión, transporte o reacción con otros gases y partículas pueden dar lugar a contaminantes secundarios como; O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, llegando a ocasionar diferentes clases de problemáticas, como son la formación de malos olores, pérdida de la visibilidad,

reducción de la cantidad de oxígeno, contaminación fotoquímica, destrucción de la capa de ozono. (ANLA & MINAMBIENTE, 2016)

Este estudio ayuda a plantear la problemática o las causas del deterioro del medio ambiente, conforme a las alteraciones del suelo, contaminantes en las fuentes hídricas y efectos negativos en la salud; al tener actividades antropogénicas, como lo son las excavaciones que ocasionan un aumento de fenómenos de erosión y estas a la vez genera un cambio en el ecosistema; se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de ocho estaciones del Departamento de la Guajira en los períodos 2013 al 2019, a través del SISAIRE (subsistema de información sobre calidad del aire), el cual es una plataforma de información virtual, que posibilita al IDEAM realizar estudios y capturas constantes con base a los datos establecidos por las autoridades ambientales que reportan en el sistema con base a la calidad del aire, este medio de información permite recolectar las variables meteorológicas y de calidad del aire, este sistema es creado por distintos sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Este sistema es administrado por las autoridades ambientales, suministrando con calidad los recursos de la información ambiental que se necesite mediante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible proporcionando acceso de la información a los ciudadanos y las instituciones encargadas de la investigación en el contexto ambiental. Con base en lo anterior, se registró un promedio de 58.96  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de material particulado, evidenciando las problemáticas que registra la extracción de carbón a cielo abierto, demostrando la importancia de generar un desarrollo de investigación en donde se analice y evidencie cómo se actúa frente a las alteraciones ambientales generadas por la explotación de este mineral a cielo abierto en el departamento de la Guajira.

Así mismo, se podrá identificar la distribución espacial del material particulado y controles de la calidad de aire, reflejando cómo las fuentes generadoras de contaminantes atmosféricos no cumplen con los marcos de la política pública que están regidas por las entidades responsables del control ambiental y la reparación de daños ambientales producidos por la minería.

Para lograr identificar cómo es el comportamiento del material particulado y sus características, se utiliza el concepto de la geoestadística, que permite tener un análisis completo y generar simulaciones del material particulado. Su función, es aportar soluciones de gran valor en diferentes disciplinas y técnicas, como el desarrollo, análisis y distribuciones de variables que estén asociadas a la información espacial, con base en una lista de métodos, en donde el objetivo es estimar valores desconocidos a partir de información obtenida.

## **2. Formulación y planteamiento del problema**

Por medio del informe del Cerrejón del 2017, el desarrollo de este proyecto “*cuenta con 69 mil hectáreas, esta una de las minas de carbón a cielo abierto más grandes del mundo*” (Cerrejón, 2017)

Para el período del 2017 se elaboró alrededor de 32 millones de toneladas de carbón, teniendo un alto nivel de comercio y venta hacia el 99% de esa cantidad (Cerrejón, 2017). Para la ejecución de extracción de carbón se necesita la remoción de gran cantidad de material estéril. Este procedimiento se lleva a cabo por la perforación y la generación de voladuras de zonas, usar excavadoras, vehículos de transporte, cargadores, almacenar el material estéril y además el carbón. En la ejecución de las operaciones se generan partículas que permanecen suspendidas en el aire y que viajan a los alrededores de la mina por medio de las acciones meteorológicas. (Uniandes, 2019)

El volumen de la operación minera en La Guajira trae como consecuencia el aumento de los niveles de contaminación y deterioro de la calidad del aire como lo menciona (Fagundo Castillo & Doria Argumedo, 2017), en su estudio sobre los niveles de metales en partículas atmosféricas en la zona minera de carbón, Norte de Colombia. A eso se suma que la mina está en una zona insular que presenta condiciones meteorológica como “*la temperatura promedio de 29,3°C (con intervalo 22,5°C – 34,7°C), humedad relativa de 70,5% (con intervalo 34% - 90%), velocidad del viento de 6,8 km/h (con intervalo de 0,4 km/h – 10,9 km/h) , y promedio de lluvia de 2,4 mm (con intervalo de 0,25 mm – 38,10 mm)*”, estas condiciones meteorológicas son propicias para las altas concentraciones de polvo atmosférico, la dispersión de las partículas suspendidas y su disolución en la atmósfera,

generando impactos negativos en la salud por todas las problemáticas que traen con ello, como afectaciones al sistema respiratorio, enfermedades cardiovasculares, afecciones en la piel (OMS), el olor a azufre que impregna los pueblos vecinos cada vez que llueve.

Investigaciones realizadas por Bedoya & Martínez, 2013, en el Valle Aburrá de Antioquia en relación con partículas de material particulado ( $PM_{10}$ ) en donde los valores varían entre 28 y  $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$  generados por la congestión vehicular e incrementado la contaminación atmosférica, que supera los niveles de precaución internacional de ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), excediendo las directrices que traza la OMS, proyecto que los niveles de contaminación aumento en los últimos periodos registrando que los niveles superaron los  $203.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por encima de los niveles permisibles establecidos por la OMS de ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para la salud de las personas, con base a los niveles de exposición crónica.

Por lo anterior en este proyecto, la generación del material particulado es el punto de vista a investigar, analizar y comprender, conociendo que la minería a cielo abierto es el origen de estos contaminantes, se analizará los reportes de las estaciones meteorológicas que son: Conejo, Pacharoca, Barrancas, Papayal, Provincial, Albania, Cuestecitas, Hatonuevo, Los Remedios, con el fin de identificar qué fuentes fijas o móviles son las generadoras de la mala calidad del aire.

Para identificar el comportamiento del material particulado, se usó el método Gaussiano que permite describir la distribución tridimensional de una pluma bajo condiciones meteorológicas y de emisiones estacionarias.

Al llevar a cabo este tipo de investigación se crea la posibilidad de realizar estudios y análisis con mayor frecuencia y detalle, evidenciando temas como la generación de impactos ambientales, requerimientos sobre las licencias ambientales otorgadas “TÍTULOS MINEROS” que cumplan con las leyes ambientales, como también los impactos que genera en la salud.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

- Evaluar la dinámica de la distribución espacial del material particulado PM<sub>10</sub> en la zona carbonífera de la baja Guajira Colombiana, durante el periodo 2013 y 2019.

#### 3.2 Objetivo Específico

- Determinar la distribución del material particulado PM<sub>10</sub> en la zona carbonífera del departamento de la Guajira, durante el periodo 2013 y 2019.
- Analizar la distribución espacial y temporal del material particulado PM<sub>10</sub> en la Zona Carbonífera del departamento de la Guajira, durante el periodo 2013 y 2019.

### 4. Marco Teórico

Se identifican tres tipos de minería a cielo abierto o superficial, subterráneas y de pozos de perforación. En este documento se evalúa la minería a cielo abierto que se efectúa a través del desarrollo de eliminación de la vegetación y de las capas superiores del suelo con el fin de conseguir el mineral (Velasquez Villegas, Milena, uribe Castaño, & Mosquera Ayala, 2016). Por medio de la minería a cielo abierto logra alcanzar diferentes minerales uno de ellos el carbón. La minería subterránea se realiza a través de la formación de túneles con el fin de alcanzar los yacimientos más profundos de un mineral en particular, como se menciona mediante el informe de la minería generado por el de la Agencia Nacional Minera “*el cual destaca los procedimientos para la ejecución de esta actividad; perforación de pozos, se emplea para extraer y obtener recursos minerales como el gas o petróleo*” (MINERA, 2018). Estas perforaciones se llevan a cabo en diversas áreas donde se identifiquen los diferentes recursos minerales. (Gómez, 2016)

Durante los años se han generado diferentes desastres ambientales relacionados con el sector económico, posteriormente ocasionados por las deficientes prácticas realizadas a cabo durante esta actividad, entre los principales impactos que se presentan en la minería se

localizan: el deterioro de la corteza terrestre, la contaminación de las aguas, la afección a la flora y fauna del entorno próximo a la explotación minera y las afectaciones a la salud en las poblaciones aledañas a la zona minera, debido a las modificaciones del estado físico (OCMAL, 2019).

Entre los principales impactos que ocurren en la minería a cielo abierto se obtienen: daños a la superficie, cambios en la corteza terrestre, generando cantidades de desechos, como se evidencia en el estudio de impactos ambientales de la extracción de recursos naturales en el departamento de La Guajira por (Ulloa. A, Donato. L. 2013) identificando las variaciones la morfología local genera una contaminación en el aire, durante este proceso se da origen cantidades altas de materia fina de característica tóxica, formados por químicos pesados que son adheridos por los animales y seres humanos, al igual generan contaminación en las aguas superficiales, si estos residuos no son oportunamente tratados y almacenados pueden llegar hasta los caudales, contaminándolos y deteriorando la vida actual y ocasionando daños a los acuíferos subterráneos. Los desechos contaminados son lavados por el agua de lluvia, filtrándose al subsuelo, ocasionando contaminación en los yacimientos de agua subterránea, impactos sobre la flora y fauna. (Escobar, Donato, Donato, & Escobar, 2013)

La extracción de estos minerales crea problemáticas generando un desequilibrio natural y cultural afectando a la población aledaña al proyecto minero, como también ocasiona impactos directos hacia los ecosistemas, como lo son en los glaciares, el cual son fuente de agua para este lugar; se observa cambios y modificaciones en el uso del suelo, como la disminución de la cobertura vegetal, generado el aumento de las exploraciones y repercutiendo en la salud de los habitantes ocasionando enfermedades respiratorias, ya que el uso de maquinaria pesada trae contaminación atmosférica y material particulado.

Teniendo en cuenta que en la Guajira el complejo minero de carbón El Cerrejón, genera durante casi todas las etapas operativas una gran degradación en el medio ambiente de manera especial al suelo y la tierra, ya que suele provocar cambios importantes en la morfología del terreno pues se devasta la estructura del suelo y se reseca la zona

circundante, lo que disminuye la producción agrícola y ganadera. La actividad minera impacta intensamente sobre la flora existente, muchas veces modificándose o eliminándola.

Otras causas de la explotación minera es la alteración paisajística por la destrucción del lugar a explotar ocasionando contaminación sonora, pues las operaciones mineras producen grandes cantidades de desniveles de ruido como lo menciona, Cabrera Leal y Galvis Cadena en el informe del diagnóstico ambiental y social respecto al desarrollo minero junto a la extracción de minerales en el 2019 , en donde se destacan las siguientes operaciones *“trituración y molienda, carga y transporte de los minerales, generación de energía, entre otras fuentes de ruido”* (Valoyes cardozo, 2017).

Otro medio ambiental afectado es la variable del aire, que se nutre de impurezas sólidas provenientes las actividades mineras en donde se generan diferentes inmisiones de combustibles de carácter tóxicos que quedan suspendidos en el aire, vapores y emanaciones de cianuro gaseoso, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (Bruininckx, 2012), contaminando las aguas superficiales y subterráneas si los residuos finos que se producen pasan a formar parte de los sedimentos de los ríos y arroyos de la zona. En donde se identifica el vertimiento de aceite usado, reactivos químicos, sales minerales y sólidos residuales al suelo y a los cuerpos de agua, por medio del estudio de Medidas ambientales del marco IGAFOM (Dirección & Ministerio de minas, 2017)

La disposición de los residuos de la explotación minera en los botaderos se encuentra en contacto con el suelo, por lo tanto, cualquier reacción de drenaje ácido de roca que desencadene este material se filtró al suelo, siendo los principales causantes a la contaminación del agua subterránea, superficiales y los manantiales en la zona. Este fenómeno se presenta durante los procesos operacionales de la mina al crearse una serie de pozos, por la disposición de las rocas y/o material estéril, la generación de estos acuíferos antropogénicos temporales, a menudo presentan niveles extremos de contaminantes (Jacobs et al., 2016) lo que representa grandes impactos ambientales en las fuentes receptoras provocan una gran porosidad en el botadero, permitiendo que todos estos

materiales geológicos se puedan comportar como acuíferos y generar salidas de agua previamente inexistentes, que pueden ser de naturaleza ácida debido al proceso comúnmente conocido como drenaje ácido de mina (DAM o DAR) (Wolkersdorfer, 2008 ; Nordstrom et al., 2015).

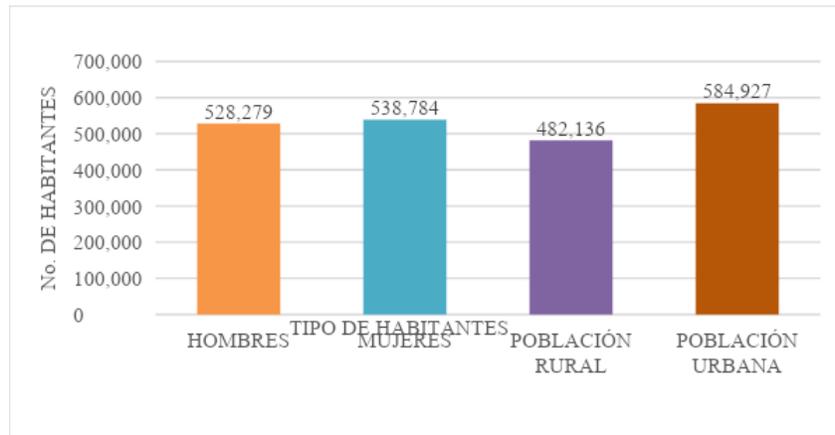
#### 4.1 Marco Geográfico.

El Departamento de La Guajira cuenta con un área de 20.828 Km<sup>2</sup>, se encuentra dividida en tres subregiones geográficas clasificadas por su clima, vegetación y economía. (Tabla 5); Alta, Mediana, y Baja Guajira, y se encuentra conformada por 15 municipios y 142 centros poblados.

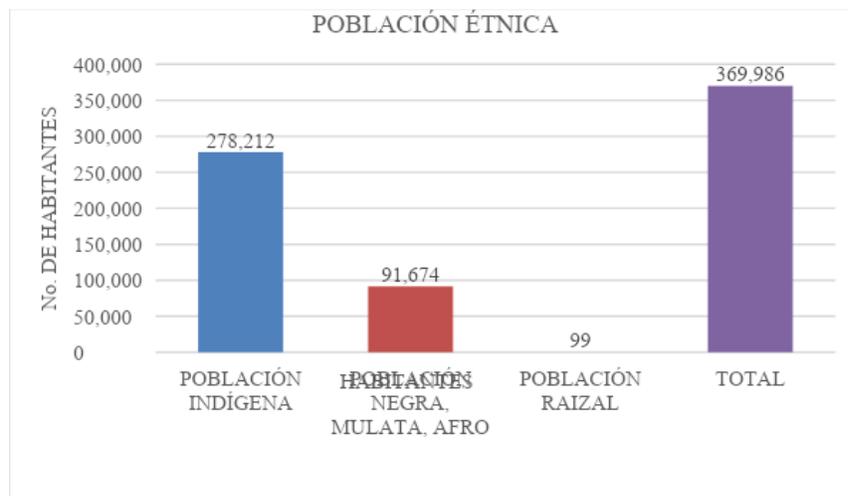
*Tabla 5. Características del Marco Geográfico del departamento de La Guajira Fuente: Informe departamental minero GUAJIRA 2017)*

Ciudad Capital	Riohacha
Extensión (Km <sup>2</sup> )	20.848
Población (Hab)	1'067.063
Municipios (No.)	15
Alta	Maicao, Uribia, Manaure
Media	Dibulla y Riohacha
Baja	Albania, Barrancas, Distracción, Fonseca, El molino, San Juan del Cesar, Villanueva, Urumita, La Jagua del Pilar.

La Guajira alberga 1'067.063 habitantes, establecidos en 15 municipios. En la *gráfica 1* se observa la distribución poblacional, donde un 54.8% son de características urbanas y 45,1% rurales, compuestas por 49,5% hombres y 50,4% mujeres. La Guajira cuenta con diferentes poblaciones étnicas *Gráfica 2* el 42,41% indígena, 13,98% negros, mulato o afros y 0.02% raizal, para un total del 56,47% de la demografía étnica. (DANE, 2019).



Gráfica 1. Distribución poblacional del departamento de la guajira, Fuente: (Sostenible O. d., 2019)



Gráfica 2. Distribución de poblaciones étnicas en el departamento de la guajira, Fuente: (Sostenible O. d., 2019)

## 4.2 Explotación del Carbón

El método minero se caracteriza por ser un procedimiento repetitivo de manera temporal y visual, permitiendo la exploración minera de un yacimiento a través de conjuntos de procedimiento, sistemas y maquinarias las cuales operan de forma ordenada, repetitiva y rutinaria.

Así mismo, se describe que los métodos mineros y el sistema de exploración, cuentan con diversas características; como lo son; las diferencias naturales que encontremos en el terreno, el modelo de topografía, entre otras condiciones ambientales que exista al momento de evaluar y realizar un diagnóstico respectivo. Los sistemas de exploración son bastante amplios:

- **Cortas:** la exploración es llevada a cabo por un banqueo descendente de características tridimensional que contiene secciones verticales de carácter troncocónicas, la extracción de cada nivel se efectúa por medio de un banco con cantidades diferentes de tajos. Se debe encontrar un desfase entre banco estableciendo plataformas de mínimas para operar los dispositivos a su máxima utilidad y con sus respectivas normas de seguridad. Su ejecución llega a ser de carácter amplio y de gran tamaño las cuales logran obtener una vida útil entre los 15 a 20 años, en varios casos se exceden los 300 m de carácter interna. (Herrera, 2006)
- **Terrazas:** este procedimiento se apoya en la adecuación de un banqueo de forma unidireccional. Se utiliza en yacimientos respectivamente horizontales, en donde se pueden llegar a presentar varios niveles mineralizados y con recubrimientos potenciales, estos niveles pueden llegar exponer profundidades que son importantes mostrando una restricción de modelo económico, en la delimitación del último nivel mineralizado, al igual se efectúa el auto relleno del aforo creado para formar la reparación de los terrenos, los equipos de minería que se ejecutan son de manera continua como las secciones de transporte y carga, de manera discontinua tenemos la trituración y el traslado con cintas.
- **Descubiertas:** este método es aplicado en yacimiento de características tumbados o horizontales, con unos recubrimientos de estéril inferior, basándose en el progreso unidireccional de un módulo con un solo banco, en donde se implementa el banqueo y se empieza el arranque del material estéril, llegando así a generar el primer módulo de excavación, es allí donde el mineral es extraído desde el fondo de dicha

excavación y los equipos a utilizar depende del volumen de material estéril a extraer; siendo de frecuente utilización las dragas línea para su fácil adecuación en dichas lugares de disposición y adecuación para su transporte y carga.

- **Contorno:** son yacimientos de carbón con capas tumbada, que presentan una topografía desfavorable y con bajos potenciales de adecuación, esto genera una condición adversa, en donde se llega a implementar las condiciones y metodologías de minera de contorno, que consiste en la extracción de material estéril y mineral de manera transversal, generando un banqueo único progresivo de condiciones longitudinales, en donde el desarrollo de estas exploraciones implementa una transferencia de los materiales estériles para una recuperación y adecuación de las zonas, los equipamientos y el uso de maquinarias son clasificados de uso convencional es decir la acción de motores de usos de hidrocarburos. **Cantera:** es denominado por el término genérico en donde este se implementa por las explotaciones de las rocas de tipo industrial (áridos, conglomerados), y materiales de características de construcción, para su exploración se deben tener en cuenta los planos de estratificación, las diaclasas y sus fallas como los planos de fractura; las canteras logran subdividirse en dos clases, con el fin de alcanzar un fragmento idóneo para la producción de servicios industriales, este prototipo de canteras tienen la característica de tener grandes alturas, en el segundo tipo de cantera encontramos a las explotaciones que tienen gran variedad de banqueos que son ejecutados por maquinaria especializada con el fin de obtener cortes limpios.
- **Graveras:** Este método suele llevarse a cabo en un solo banqueo y tiene una condición de una profundidad inferior, generando unas características importantes como profundidades de 20 m, el equipamiento para este método son palas, volquetes y las dragas líneas, que tiene contacto con el subsuelo generando así diferentes niveles de banqueos.

- **Minería hidráulica:** es un método de mineralización especial para la extracción de canteras, metal y oro, estas minerías se encuentran contenidas en aluviones utilizando el método degradado, se emplea para adecuar la concentración de grandes volúmenes de material extraído.
- **Lixiviados/especiales o mixtos:** la lixiviación consiste en la extracción química de los minerales o materiales que encontramos en el depósito, el procedimiento es llevado a cabo por diferentes métodos de lixiviación como lo son: la lixiviación en Heras” o “lixiviación en pilas” los cual conlleva a tratamiento adicional para el mineral, como lo son en tanque que disponen de agitadores llegando a generar el procedimiento de lixiviación dinámica. En los métodos mixtos se desarrollan las exploraciones de manera simultánea, como lo son las subterráneas y las de cielo abierto, en donde estas tienen en la extracción parcial del mineral, y se implementa la utilización de equipamientos especiales para efectuar el arranque y transporte de dicho mineral.

Debido a las condiciones fisiográficas, geomorfología, que presenta en su mayor parte la península de la Guajira y teniendo en cuenta su relieve que incluye montañas, acantilados, planicies y dunas. (Hébert, 2006) se puede evidenciar los anteriores técnicas y sistemas de exploración minera.

### **4.3 Fuentes de Contaminación atmosférica.**

En el título 5 del Decreto 1076 de 2015, contenido en el decreto único reglamentario 250 de 2017 del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible define la contaminación atmosférica como un fenómeno de acumulación y concentración de contaminantes, presentando efectos nocivos para la salud e impactos negativos al medio ambiente.

Diversos estudios advierten que las enfermedades que afectan a las poblaciones cercanas de la zona de producción de minerales se relacionan con la composición y la concentración del material suspendido en el ambiente (Aneja, 2012). Estos compuestos dependen de la

fuentes de emisión y generan productos químicos que son considerados un problema emergente de salud pública con consecuencias y efectos adversos que se reflejan en las poblaciones (Curriero, 2013).

La clasificación de diferentes tipos de contaminantes está determinada por su fuente de emisión en donde, se tienen las fuentes antropogénicas y las fuentes naturales, las fuentes antropogénicas se relacionan a las actividades realizadas por el hombre (procesos industriales, transporte, construcciones a gran escala, etc.) y las fuentes naturales se aprecian como aquellas que se originan a partir de procesos de carácter natural.

La generación de fuentes antropogénicas se clasifica en fuentes fijas-estacionarias, fuentes de área y fuentes móviles, esta división permite establecer clasificaciones, generando información sobre el tipo de emisiones actuales y el tiempo en que fueron

- Una fuente estacionaria es definida como toda instalación que está establecida en un lugar determinado y que tiene como propósito el desarrollo industrial de procesos de carácter comercial, servicios o actividades que generen contaminantes hacia la atmósfera, esta emite contaminantes por columnas de aire o ductos. (IDEAM, 2014)
- **Fuentes de Área:** son las que incluyen en su generación las actividades de desarrollo y procesos tales como el consumo de solventes, recubrimientos de superficies arquitectónica e industriales. También tienen en cuenta el manejo de las actividades de tratamientos de aguas residuales, rellenos sanitarios, compostaje entre otros. (Perdiz, 2016)
- **Fuentes Puntuales:** Son todas aquellas que se derivan de las actividades industriales, que tiene como finalidad la combustión de procesos como lo son, textiles, metalurgia, químicos y actividades de desarrollo geológico como la minería.
- **Fuentes naturales:** en general todo lo emitido por el medio ambiente, la vegetación, la actividad microbiana de los suelos y aguas, son denominadas

emisiones Biogénicas las cuales generan emisiones de óxido de nitrógeno, hidrocarburos no metalogénicos, compuestos nitrogenados y azufrados.

- **Fuentes Móviles:** es la fuente de emisión que, por razón de uso y propósito se desplaza, las fuentes móviles son los vehículos automotores y una de las principales causas de contaminación del aire es la combustión, principalmente de combustibles fósiles (gasolina, Diesel), especialmente en los campos industriales, automotriz y proyectos de exploración minera estas últimas actividades son las responsables de la contaminación del aire. (CAR, 2016)

#### 4.4 Tipos de contaminantes en el aire

Se define el aire como el resultado de la mezcla de gases que componen la atmósfera terrestre, está compuesto con una cantidad mayor de nitrógeno (78%), oxígeno (21%), una pequeña proporción de argón (0,9%) y otros gases nobles (0,1%). *“Los contaminantes en el aire se identifican en primarios y secundarios, los primarios son aquellos emitidos directamente por la atmósfera por una fuente de emisión y los secundarios son el resultado de reacciones en la atmósfera a partir de contaminantes primarios y otros componentes químicos presentes en el aire”*. (Sostenible, 2020)

Los tipos de contaminantes que se encuentran por el desarrollo de la minería a cielo abierto son, monóxido de carbono, dióxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre, metano y ozono. (Cardenal, 2013). Por otro lado, una de las causas más importantes en la contaminación atmosférica es la pérdida de propiedades químicas en los suelos por la contaminación de metales pesados (Cu, Pb, Cd, Hg,) esto por aplicación de voladuras en los terrenos mineros, lo que genera la liberación de polvillo de carácter tóxico denominado contaminante atmosférico de fracción respirable menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>). Esto se relaciona con los factores meteorológicos y topográficos como indica (Arrieta, 2016) de los procesos minero-industriales generando impactos en el medio ambiente. En la *tabla 1* se puede evidenciar la Clasificación de los contaminantes atmosféricos y su influencia en el medio ambiente.

#### 4.5 Contaminación del aire por material Particulado.

Según su origen, los contaminantes antropogénicos son derivados de la actividad humana y se evalúan mediante el comportamiento de las extracciones mineras, la generación del material particulado en las zonas mineras abandonadas y examina la contaminación ambiental en las comunidades que presentan enfermedades crónicas por la alteración de contaminantes atmosféricos. (Ann Y., 2013). El estado físico en el que se encuentren los componentes químicos de las partículas se deposita cerca de las fuentes de emisión, si son de un diámetro muy pequeño estas pueden mantenerse suspendidas y ser transportadas a grandes distancias (Oyarzun, 2010)

*Tabla 1. Clasificación de los contaminantes atmosféricos y su influencia en el medio ambiente. Fuente: Adaptada de (Oyarzun, 2010).*

<b>Tipos de partículas</b>	<b>Características de formación</b>	<b>Características químicas</b>	<b>Características que influyen en el ambiente</b>
	*Condensación de gases	*Sulfatos *Carbono elemental	*En los procesos de remoción estos se difunden

Ultrafinas (PM <sub>0,1</sub> )	*Nucleación de gases atmosféricos; NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	*Compuestos metálicos *Compuestos orgánicos (los cuales están presentes con temperatura ambiente y una baja saturación de presión	en gotas de lluvias y otras superficies. *Su solubilidad no es muy específica lo cual no es muy bien caracterizada *Su promedio de vida o presencia en la atmósfera es de horas, con sus variaciones de distancias
Finas (<PM <sub>2,5</sub> )	*Condensación de gases *Coagulación de partículas pequeñas *Generación de gases los cuales reaccionan en partículas *Procesos de evaporación en donde el agua ha reaccionado con los gases	*Sulfato, nitratos, amonios, iones de hidrógeno *Bacterias, virus *Compuesto metálicos [PB, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe] *Gran variedad de compuestos orgánicos	*Su solubilidad y tienen características higroscópicas y deliquescente la cual tiene como característica absorber la humedad del aire. Y disolverse en ella. *Su distancia o mitigación es caracterizada de manera local, en donde su presencia en la atmósfera puede ser de días o semanas.
Gruesas (PM <sub>2.5 - 10</sub> )	*Procedimientos de mecanismos con maquinarias pesadas (retroexcavadoras, rompimiento de suelos,) *Evaporación de excavaciones, aerosoles.	*Nitratos, cloruros, sulfatos de reacciones; HNO <sub>3</sub> , HCl, SO <sub>2</sub> . Óxidos de elementos de la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe)	*Su solubilidad es de características insoluble *Para su remoción en la atmósfera depende de las precipitaciones secas o eliminación por gotas de lluvia.

\*Reacciones de gases sobre las partículas.

\*El deterioro de plantas y animales, las bacterias, moho, esporas de hongos

\*Su tiempo determinado en la atmósfera varía entre horas y días dependiendo de la fuente emisora.

#### **4.6 Transporte y dispersión de contaminantes en el aire**

La contaminación atmosférica está dada por una fuente de emisión de carácter natural como las erupciones volcánicas o incendios, al igual que por características antropogénicas siendo esta la fuente de contaminación atmosférica principal.

Las sustancias contaminantes de la atmósfera tienen origen antropogénico presentando variaciones que tienen repercusiones en el medio ambiente y la salud. Estas sustancias de carácter nocivo son designadas como contaminantes y se encuentran establecidas en la resolución 2254 del año 2017, implantando que los valores máximos de las concentraciones de los contaminantes no deben ser superados. (Murillo, 2017).

El transporte de contaminantes y su dispersión en el medio son analizados en 3 niveles distintos; escala planetaria (macro escala) en donde los fenómenos presentados resultan de los impactos de largo plazo de las emisiones de contaminantes, para este nivel se evalúa el efecto invernadero y la disminución de la capa de ozono. La escala regional (meso escala) identifica los fenómenos presentados con la reproducción de las reacciones químicas de contaminantes en la atmósfera y van dirigidos al análisis fisicoquímico y el último método de evaluación es la escala local (sub meso escala) los fenómenos evidenciados aquí son de carácter puntual (emisiones puntuales) los cuales se pueden ir presentado en variaciones de horas o días y esta generación depende del desarrollo industrial (Pérez. M, 1998).

La formación de las emisiones atmosféricas y los fenómenos de dispersión de dichos contaminantes son producidas en la capa más baja de la troposfera, la capa límite atmosférica se encuentra directamente influenciada por las características de la superficie terrestre, por lo cual se puede detectar y determinar la dispersión de los contaminantes y su

forma de transporte catalogadas en dos fases, meteorológicas y físicas. Para la fase meteorológica encontramos factores como el viento, el gradiente vertical de temperatura, la turbulencia y el fenómeno de inversión térmica y en la fase física se encuentran la dispersión de los contaminantes atmosféricos por medio de las corrientes de viento, sus variaciones, el registro de precipitación y lo que influye en sus trayectorias (Silva, 2016)

#### **4.7 Sistemas de información geográfica SIG**

Los sistemas de información geográfica (SIG) son elementos de trabajo de carácter amplio y es una herramienta fundamental para el desarrollo de datos especiales de carácter geográfico. El crecimiento informático ha tenido gran relevancia con los SIG ya que se han desarrollado de forma rápida y han avanzado a medida que evoluciona la tecnología. Los SIG permiten el desarrollo de, análisis de imágenes, diseño de adecuamiento de zonas topográficas, base de datos meteorológicos, herramientas de georreferenciación entre otros. Por esto se consultó a las entidades del estado que trabajan y emplean la información geográfica como lo es el Ministerio de Educación Nacional que describen la implementación de un SIG como un sistema de datos abiertos en donde el usuario puede ver, consultar y trabajar las diferentes clases de mapas que puede almacenar el sistema para llegar u obtener resultados específicos, como también lo describe el Instituto Nacional de Estadística y Geografía el cual define a un SIG (geografía, 2014), como el conjunto de herramientas que tienen como objetivo la creación de mapas profesionales de calidad gráfica excelente con una gran diversidad de símbolos, a diferentes escalas y proyecciones. Además, puede producir, capturar, almacenar, procesar, manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada del mundo real (Sistema de Información Geográfica 2014).

#### **4.8 Calidad del aire en la Guajira.**

Mediante los informes de la corporación autónoma regional de CORPOGUAJIRA se identificaron reportes de calidad del aire que fueron implementados en el plan de acción 2016-2019, contando con un sistema de vigilancia, monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. SEVCA es un sistema especial de evidencia de calidad del aire el cual está

dispuesto para analizar y medir las influencias de las emisiones atmosféricas generadas por las fuentes fijas o móviles en las zonas mineras con índices de alto impacto. Por medio de este informe se evaluó el nivel del material particulado generado por las actividades de extracción de carbón se obtuvo pro medio del monitoreo las afectaciones de las afecciones a poblaciones aledañas y los impactos ambientales formados (Acosta, 2019). Los puntos de muestreo se encontraban ubicados en los proyectos mineros con el fin de identificar el comportamiento de las emisiones atmosféricas que se generan dentro del departamento de La Guajira, las cuales están cerca de las áreas de influencia que generan las multinacionales de empresas de Carbones del cerrejón. Las estaciones monitoreadas por CORPOGUAJIRA para el análisis de la calidad de aire en la guajira se encuentran en la (Tabla 2)

*Tabla 2. coordenadas de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de CORPOGUAJIRA FUENTE; informe mensual de la calidad del aire en la guajira.*

Estación	Ubicación	Coordenadas (Datum Magna Sirgas)		Altura (msnm)
		N	W	
<b>Conejo</b>	Corregimiento de conejo, Fonseca	10°46'57.2"	72°47'46.1"	272
<b>Pacharoca</b>	Corregimiento Reasentados, Barrancas	10°56'29.1"	72°48'09.7"	143
<b>Barrancas</b>	Zona Urbana de Barrancas	10°57'40.1"	72°46'41.5"	141
<b>Papayal</b>	Corregimiento de Papayal, Barrancas	10°59'43.5"	72°46'26.4"	155
<b>Provincial</b>	Resguardo Indígena de Provincial, Barrancas	11°01'26.5"	72°44'15.2"	130
<b>Albania</b>	Zona Urbana de Albania	11°09'27.1"	72°35'18.2"	95
<b>Cuestecitas</b>	Corregimiento de Cuestecitas, Albania	11°10'55.1"	72°36'29.3"	120
<b>Hatonuevo</b>	Zona Urbana de Hatonuevo	11°03'50.3"	72°45'58.6"	201
<b>Los Remedios</b>	Corregimiento de los Remedios, Albania	11°05'55.6"	72°32'31.3"	155

*Tabla 3. Representación promedio del material particulado PM10, evaluado la norma 2254 del 2017. Fuente (Ministerio de Ambiente)*

Estación	% Representatividad (debe ser ≥ 75%)	Promedio Anual Indicativo (µg/m <sup>3</sup> )	Norma Anual (µg/m <sup>3</sup> )
<b>Albania</b>	21,67	39,50	

<b>Conejo</b>	21,67	41,25	
<b>Barrancas</b>	20,83	29,65	
<b>Cuestecitas</b>	15,83	38,27	
<b>Hatonuevo</b>	20,83	33,38	50,00
<b>Los Remedios</b>	20,83	30,36	
<b>Pacharoca</b>	18,33	40,46	
<b>Papayal</b>	22,50	37,99	
<b>Provincial</b>	16,67	45,36	

En la *tabla 4* se identifica el marco normativo aplicable conjunto general de normas, criterios, metodologías, lineamientos y sistemas, que establecen la forma en que deben desarrollarse las acciones en las minas.

Tabla 4. Marco normativo de la minería. Fuente ANLA

Identificación			Entidad	Descripción de la Norma/Artículo
tipo	número	año		
Resolución	32	2016	Agencia Nacional Minera	Por lo cual se modifica la delimitación de las áreas de reserva estratégicas mineras contenidas en la resolución numero 45 del 20 de junio del 2012
Resolución	18 0876	2012	Agencia Nacional Minera	Por medio de la cual se reasume una función por parte de ese Ministerio y se delega en la Agencia Nacional de Minería la función de fiscalización, seguimiento y control de los títulos mineros para la exploración y explotación de yacimientos minerales
Resolución	708	2016	Agencia Nacional Minera	Por lo cual se establecen los criterios para la elaboración, evaluación y ejecución de los Planes de Gestión Social, de conformidad con lo establecido por el artículo 22 de la Ley 1753 del 2015
Ley	685	2001	Congreso de Colombia	Se expide el Código de Minas. El cual tiene como objetivos interés público fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país. Por medio del presente código se regulan las relaciones jurídicas del Estado con los particulares y las de estos entre sí, por causa de los trabajos y obras de la industria minera en sus fases de prospección, exploración, construcción y montaje, explotación, beneficio, transformación, transporte y promoción de los minerales que se encuentren en el suelo o el subsuelo, ya sean de propiedad nacional o de propiedad privada.
Ley	1333	2009	Congreso de la Republica	Por lo cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones
Resolución	2206	2017	Ministerio de Ambiente	por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones

## 5. Estado de conocimiento

### 5.1 Experiencias internacionales

El caso estudio que se tomó como referencia fue en el estado de Perú sobre el análisis de “nuevos escenarios de emisiones de contaminantes del sector minero industrial”, en donde se quiere evaluar los diferentes escenarios de emisión de contaminantes, generados en un ambiente de congestión vehicular por el transporte del mineral a tratar como es el carbón, donde se puede llegar a determinar las variaciones de concentraciones emitidas como el material particulado, llegando a identificar los rasgos de la velocidad de recorrido, determinando las diferencias de emisiones de un ambiente el cual contenga congestión vehicular (Fuentes Fijas ) y otro sin esta congestión vehicular. Evaluando los lineamientos ambientales requeridos por las normativas ambientales, una de ellas es la normativa peruana (6.1- ESDA,2013) de emisiones de contaminación atmosférica, en donde se establece los parámetros para el sector minero en donde se determina cuales están implementados por medio de porcentajes con sus respectivas a las clases de contaminantes generados. El contaminante más relevante son los óxidos de nitrógeno, el material particulado emitido por las extracciones mineras ya que esta generación depende gracias a él de transporte del mineral, los tajos mineros y las actividades de almacenamientos (Perú, 2013) (ESDA,2013- normas y parámetros ambientales sobre la contaminación atmosférica en Perú).

(Rosa, 2017) en su artículo “Introducción a los sistemas de información geográfica” menciona como la contaminación atmosférica es el principal desafío para las autoridades ambientales de Chile, donde establece e implementa planes de descontaminación atmosférica entre los años 2014 y 2018, en el año 2015 se declaró a la comunidad de los Ángeles en la región del Bío en el sur de Chile como una zona saturada por la generación de los elevados niveles de contaminantes atmosféricos que se presentó durante los meses de invierno, por la generación de emisiones de material particulado de características  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10}$  causado por la combustión de estufas a leña. Estudios han identificado que la exposición de niveles altos de contaminantes genera impactos hacia el medio ambiente y a

la salud de las poblaciones aledañas, por lo cual el Ministerio del Medio Ambiente diseñó un plan de manejo ambiental que implemente medidas y acciones específicas para la generación de la recuperación de la calidad del aire (Vargas, 2019), como resultado de este trabajo se determina y considera la toma de decisiones técnicas y políticas ambientales para la ejecución de medidas ambientales para conseguir una adecuación de la gestión ambiental del territorio saturado por  $PM_{2,5}$  y  $PM_{10}$  debido a la combustión de condición artesanal en períodos de invierno, implementando el sistema de modelación AERMOD se permite establecer los puntos de máximos factores de emisiones y así identificar cómo es la influencia del material particulado en las poblaciones.

(Belén, 2019) Realiza un modelo estadístico de la concentración de  $Pm_{10}$  en la región de Castellón (España) con un período de evaluación entre en los años 2015-2006, para lo cual se pueda comprender el comportamiento de la tendencia anual del  $PM_{10}$ , en un modelado espacial-temporal dando a conocer la influencia de las variables en el riesgo de exposición, encontrar los datos faltantes para evaluar la calidad del aire y estimar los datos para aquellos sitios que no sean disponibles. Esta evaluación es esencial para mejorar las políticas de calidad del aire y los sistemas de alerta temprana los cuales están establecidos por el Marco de la Unión Europea.

(Nazeer, 2019) para lo cual evalúa una población en Finlandia que están en exposición prenatal, de los nivel individuales de contaminantes del aire con el interés de identificar las influencias que repercuten desde las etapas prenatales, concepción y hasta el nacimiento, por lo cual se aplicó, el análisis de regresión de Poisson para estimar las razones de riesgo ajustadas con intervalos de confianza (IC) del 95% y se evalúan las concentraciones de contaminantes como el  $PM_{2,5}$  obteniendo intervalos de confianza en las razones de riesgo en (IC 95%:0.85, 2.23) y el  $O_3$  (IC 95%:1.15, 2.35). los cuales son contaminantes que tienen grandes efectos de exposición durante toda la etapa prenatal.

(Sbarato, 2018) en su estudio de la meteorología y contaminación atmosférica identifica que las variables meteorológicas tienen una influencia de carácter directo en la difusión de

los contaminantes que son emitidos al aire y la distribución de COV'S para lo cual su conocimiento nos permite generar una interpretación de la evolución diaria y como es el comportamiento de la concentración en la zona urbana de Córdoba, Argentina.

Los resultados obtenidos en este estudio se identificó la relación que hay entre las situaciones atmosféricas y la concentraciones de contaminantes, cada área se ve en cada parámetro, para lo cual se tiene una evaluación de cómo es el comportamiento de los COV'S llegando a identificar por medio de una modelación matemática de la distribución de las concentraciones por un malla ambiental generando el conocimiento del microclima de una forma ideológica y determinando las zonas que generan mayor interés para la prevención y detección de la contaminación atmosférica.

## **5.2 Experiencias nacionales**

(Fuentes, 2016) realizó una identificación de cómo los procesos minero-industriales realizados, llevan a cabo la generación de impactos al medio ambiente, asociados al desarrollo minero, destacando la distribución espacial, ya que esta representa, afectaciones en la calidad del aire y la generación de inhalación de las poblaciones cercanas a el proyecto. Los escenarios analizados sobre las fuentes de emisiones provenientes de la generación de las extracciones mineras generan un análisis en los tiempos de exposición diario y anual de PM<sub>10</sub>. Por lo cual, se recurrió al uso de un software AERMOD View, el modelo se ejecutó para las zonas topográficas ubicadas al municipio de Soacha y Sogamoso, generando información meteorológica en donde se pudo identificar tres tipos de fuentes de emisiones que son fuentes de característica, industrias minera denominadas como fuentes fijas de dispersión, se obtuvo como resultado el comportamiento meteorológico por medio de una rosas de vientos identificando la dirección del viento y velocidad del viento están relacionadas lo cual permite un flujo libre de dispersión para el material particulado y se identifica el radio crítico y la deposición de las partículas generadas.

La ley 134 del 2017 de la República Colombiana, establece; *“Los derechos a la salud y al medio ambiente sano imponiendo restricciones a las emisiones de contaminantes de fuentes*

*móviles y se dictan otras disposiciones”* (CONPES, 2018). El artículo 3 hace una proyección al año 2020, donde se tenga un control de la importación y la línea de ensamblaje en la misión de alcanzar en las emisiones de los contaminantes los niveles máximos permisibles.

(Pabón, 2010) realizó una distribución espacial en Bogotá D.C sobre las fuentes de emisiones provenientes de la generación de fuentes móviles y fuentes fijas de la ciudad, por el incremento que ha presentado Bogotá de manera exponencial tanto en la población como en el sector económica, registrado por la Cámara de comercio de Bogotá indicó que la tasa de incremento económico entre los años 2000 y 2008 fue de 2.47%(CCB, 2009) lo cual ocasionó un incremento en la generación y obtención de energía por medio de combustibles fósiles y un foco máximo de emisión en contaminantes hacia la atmósfera, realizando así un deteriorando en la calidad del aire de la ciudad. Esta investigación realizó un modelamiento de los contaminantes de fuentes móviles (CO, NO<sub>x</sub>, SO, PM, y COV'S) y de fuentes fijas (CO, NO<sub>x</sub>, SO y PM. ) en donde adecuo un malla de 55 x 55 km con una resolución de celdas de 1 km, el desarrollo de la modelación se realizó implementado el programa ArcGIS y determinó que las celdas en las que se generan la mayor cantidad de emisiones se encuentran en la zona industrial del distrito capital, las vías que tiene mayor flujo de vehículos de carga pesada y determinando también las mayor cantidad de emisiones de fuente móviles ocurren en el intervalo de tiempo 24 horas diarias.

### **5.3 Experiencias Locales**

(Alfonso, 2016) realizó un análisis de la relación entre el PM<sub>10</sub> y las infecciones respiratorias en el sector minero de la Baja Guajira Colombiana, mediante la generación de datos del Sistema Espacial Vigilancia de Calidad del aire en la Zona carbonífera de la baja Guajira (SVCA)(CORPOGUAJIRA), se realizó la estimación entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> y las infecciones respiratorias en el sector de la baja Guajira, debido a las actividades mineras de exploración de carbón a cielo abierto, generando la adecuación de una base datos, que le facilita obtener información organizada llegando a identificar los mayores valores de propagación del PM<sub>10</sub>. Utilizando el modelo de dispersión CALPUFF como

herramienta para predecir las contribuciones de PM<sub>10</sub> en los receptores ambientales seleccionados, en un dominio de 150 Km por 150 Km con resolución de 1 km<sup>2</sup> e implementó el modelo Gaussiano para identificar cual es la población más vulnerable, identificando el rango de distancia que hay entre la fuente generadora de contaminantes con las poblaciones aledañas.

Un análisis de los registros de calidad del aire de la zona carbonífera del Cesar realizado por (CAMACHO, 2012), su función principal fue estructurar una base de datos, donde se facilitara el análisis de la información, para que fuera implementada en la evaluación de la variación espacial de las concentraciones medias registradas por la red minera en el período de 2011-2007, generando mapas de características isométricas en donde evidencia las áreas de mayor influencia de contaminantes atmosféricos como lo son (PST y PM<sub>10</sub>) que corresponden al sector del área de estudio denominado como área de influencia .

## **6. Metodología**

### **6.1 Zona de Estudio**

El yacimiento de carbón El Cerrejón en la Guajira, es un proyecto de extracción minera a cielo abierto, ubicado en la Latitud 10°59'19.41"N y Longitud 72°42'5.57"O está situada en la cuenca del río Ranchería, en el Departamento de La Guajira en la parte sureste, en la Sierra Nevada de Santa Marta por el este y por la parte del oeste en la Serranía del Perijá, cruzando la línea de la frontera con Venezuela, hacia el sur limitando con el departamento del Cesar, entre los municipios de Albania, Barrancas, Conejo, Cuestecitas, Hatonuevo, Los Remedios, Papayal, Provincial.

### **6.2 Topografía y Geología.**

El departamento de la Guajira se fracciona en tres áreas, alta, media y baja Guajira, esta última está conformada por rocas sedimentarias, metamórficas y en cierta parte ígneas, estas rocas se encuentran localizadas en bloques limitados entre sí por dos grandes fallas de características geo-estructural, el departamento se divide en dos eras geológicas la primera corresponde a la península de la Guajira donde se reconocen tres sistemas de fallas

primordiales, Falla de la Oca, Falla Cuisa, Falla Simarua. La segunda corresponde al área sur en el cual se encuentran 3 sistemas de fallas principales; Falla OCA, Santa Marta-Bucaramanga y del Cerrejón. (Martínez. O, 2019)

La topográfica de la región, se caracteriza por la llanura aluvial de la cuenca del Río Ranchería, al este las Serranía del Perijá y al oeste, la Sierra Nevada de Santa Marta, donde se generan los yacimientos de carbón, los cuales se encuentran ubicados dentro de la formación del Cerrejón de la edad del paleoceno, entre las Fallas de Ranchería y la Falla de Cerrejón, estos yacimientos son uno de los más estudiados geológicamente por el Servicio geológico colombiano. (Martínez. O, 2019).

### **6.3. Climatología e Hidrología.**

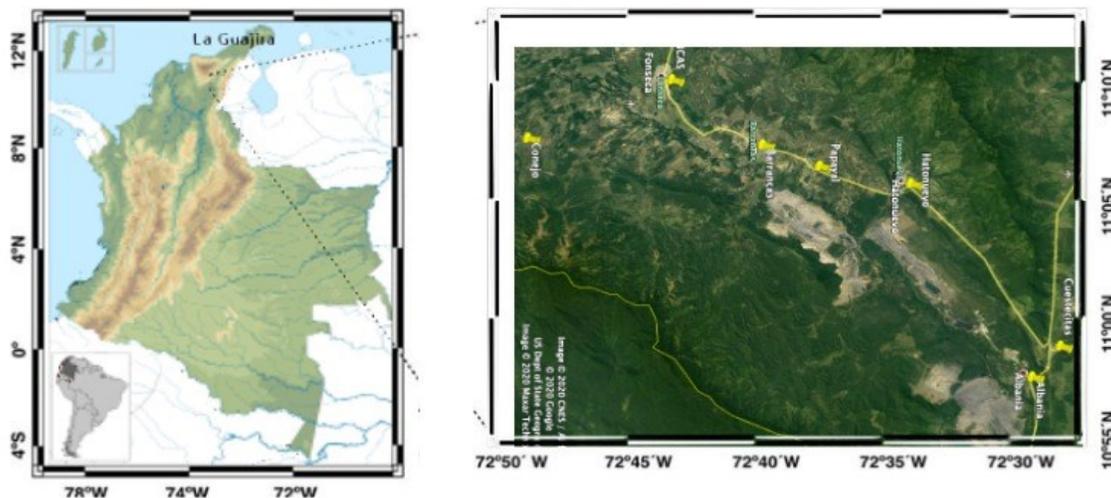
El clima de la Guajira está influenciado por los sistemas montañosos de la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta, se destaca por tener pisos térmicos de la zona intertropical, con temperaturas que oscilan entre los 35°C y 40°C.

La velocidad promedio del viento oscila entre los 30- 36 metros por segundo (m/s), los meses más fuertes son en febrero, marzo y julio. La intensidad y persistencia de estos vientos presentan un rango entre los 5 a 11 m/s durante todo el año lo cual indica que el departamento tiene un gran potencial para la generación de energía eólica.

La Guajira es catalogada como uno de los climas más áridos de Colombia, su territorio se caracteriza por tener zonas áridas o semiáridas, algunas de estas áreas no cuentan con vegetación y recurso hídrico, las precipitaciones tienen un régimen bimodal, con un promedio anual de 548 mm con 72 días de lluvia y alta humedad relativa indicando una media anual del 70% de los meses más lluviosos desde septiembre a noviembre.

Posteriormente se presenta una temporada de seca en los meses de diciembre a abril, donde la precipitación disminuye a 22 mm aproximadamente, esto se debe a la presencia de los vientos alisios que llegan del noreste con una fuerte intensidad. (Martínez. O, 2019).

La operación se desarrolla en el complejo minero en Baja Guajira que incluye una mina de carbón térmico al aire libre, que por las variaciones climatológicas las partículas se hacen más volubles. La producción anual de la mina supera los 34 millones de toneladas, existen 6 minas activas a cielo abierto y el área de impacto directo de la producción mayor de 69,000 hectáreas (Cerrejón.2017) (UPME, 2017), lo que repercute en un alto grado de contaminación.



*Figura 1. Localización de la mina del Cerrejón con sus estaciones de monitoreo en la Guajira. Fuente: Google Earth.*

#### **6.4 Aspectos Históricos.**

El aporte del departamento de La Guajira a la producción nacional minera a través del carbón y otros minerales tiene grandes acontecimientos históricos como: entre 1584 a 1863 se realizaron los primeros códigos y decretos de minas, en 1868, se hace el descubrimiento de la mina de Cerrejón, entre 1969 a 1974 se creó INGEOMINAS, se ratifica la ley 20 propiedad estatal de minerales primer proceso de legalización y se reestructura el Ministerio de Minas y Energía, en 1984 permiten los estudios públicos en áreas mineras de la Guajira.

Mediante la Unidad de Planeación Minero-Energética se realizó un informe del período de 1998 a 2003, donde la producción del Cerrejón mostró una tendencia positiva en el año 2001 alcanzando los 22.1 millones de toneladas, en el siguiente año presentó una reducción con 18 millones de toneladas, debido a los bajos precios al interior del país y en el mercado internacional, en el 2003 la producción tuvo un aumento alcanzando los 22.5 millones de toneladas (UPME. 2015).

### 6.5 Fuente de la información.

Los datos meteorológicos utilizados en el análisis se obtuvieron del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, a partir de la sección de “SISAIRE” el cual es un subsistema de información sobre la calidad del aire emitido, suministrados por las Corporaciones Autónomas Regionales como lo es CorpoGuajira. La zona de estudio corresponde en la sección baja de la Guajira entre los Municipios de Albania, Barrancas, Hatonuevo, Pacharoca, Cuestecitas, Los Remedios, Provincial y Papaya, esta cuenta con las ocho (8) estaciones de monitoreo, que tienen como objetivo proporcionar datos meteorológicos para mejorar la gestión de la calidad del aire en el complejo carbonífero. Las especificaciones de las estaciones meteorológicas y sus medidas angulares se presentan en la *tabla 6*.

*Tabla 6. Localización y evaluación de la red meteorológica de la Baja Guajira utilizada en esta investigación. (Ambiental, 2019)*

Estaciones	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (msnm)
Albania	11.151	-71a 2.612	145
Barrancas	10.892	-72.831	165
Hatonuevo	11.071	-72.757	198
Pacharoca	11.093	-72.806	167
Cuestecitas	11.181	-72.608	110
Los remedios	11.099	-72.542	166
Provincial	11.022	-72.741	150
Papayal	10.995	-72.774	155

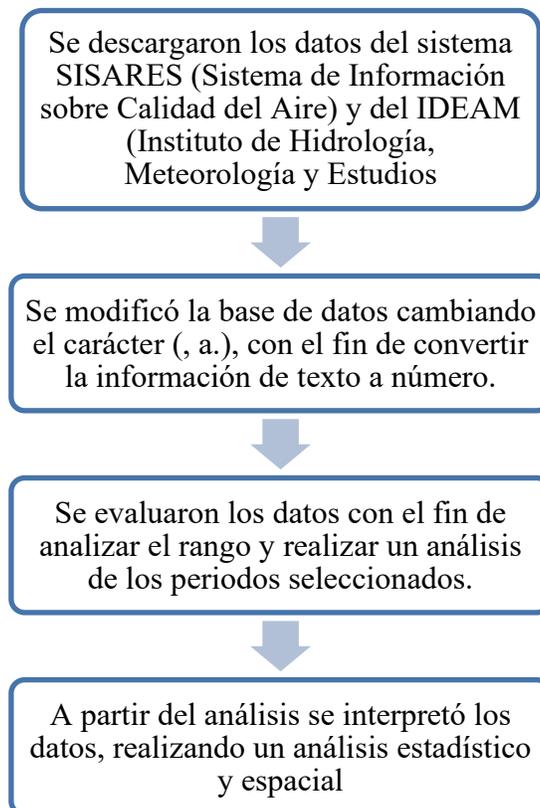
## 6.6 Preparación de la información.

Los datos de material particulado  $PM_{10}$  se obtienen de la plataforma SISAIRE, estos datos son de acceso libre para consulta y descarga en el enlace <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/>.

Se descargaron los datos del periodo de 2013 al 2019 para identificar el comportamiento de material particulado y comparando con la norma de la calidad del aire, para esto se tendrá en cuenta una evaluación de las magnitudes de resumen.

En la *tabla 7* se identifica la metodología implementada para el desarrollo del análisis estadístico y espacial.

*Tabla 7. Diagrama de la metodología implementada. Fuente propia*



## 6.7 Análisis Estadístico

El objetivo de este análisis es describir el comportamiento de las emisiones de material particulado, almacenados de forma continua en un período del 2013 al 2019, utilizando las estaciones de monitoreo de calidad ambiental.

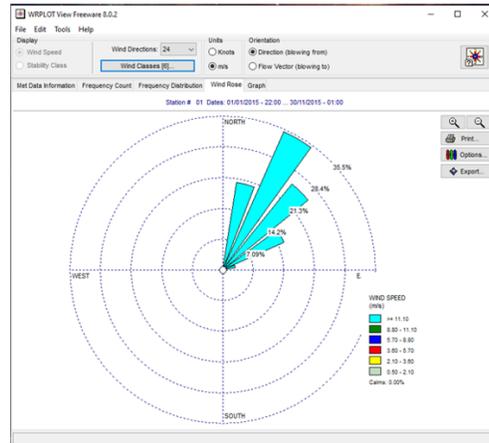
Para el análisis estadístico se recurrió a los datos de SISAIRES de la zona de la operación minera generando una comparación de los valores obtenidos por el IDEAM, por medio de la herramienta de Excel Microsoft. Identificando así los registros mensuales, con el fin de entender el comportamiento del material particulado y cómo se obtienen los resultados de las mediciones de la calidad del aire en promedios anuales.

## 7. RESULTADOS.

En la *gráfica 3*. Por medio del Programa WRPLOT View, se muestra los comportamientos de los datos meteorológicos consultados por la Plataforma de información del SISAIRES, y permite evidenciar los puntos con mayor fuente de emisión, el tiempo en que fueron emitidos por medio de la rosa de vientos, identificamos la dirección del viento y su porcentaje de velocidad. Mediante la base de datos de SIS AIRES se consultó los períodos de viento ocasionados en las estaciones de monitoreos, demostrando que el comportamiento es de característica Noreste con velocidades alrededor de 11.10 m/s equivalentes a diferentes porcentajes como lo son 35.5%, 28.4% 21.3%, 14.2% con una variación de 7.09%.

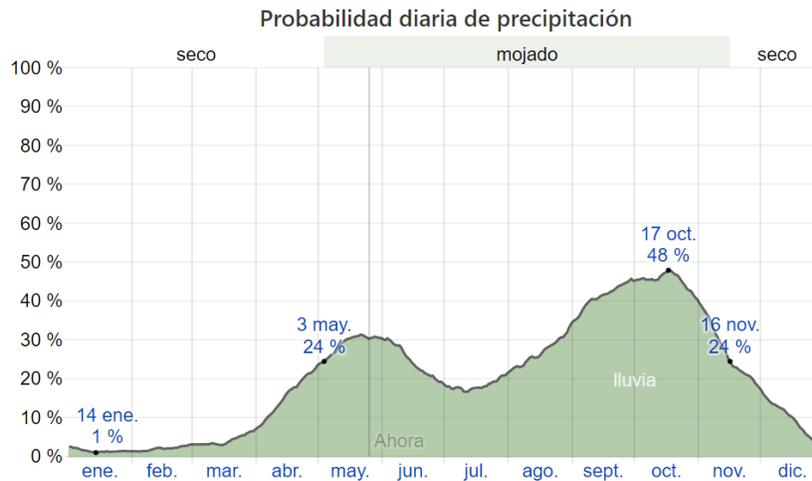
Se estudió la variabilidad espacial y temporal de PM<sub>10</sub> durante los años 2013 al 2019 en la mina de carbón a cielo abierto. (Agencia Nacional Minera) ubicada en el noreste de Colombia. Los resultados mostraron concentraciones promedio de PM<sub>10</sub> de 69.32 µg/m<sup>3</sup> siendo el más alto registrado durante el estudio. Así mismo, se observó que las condiciones meteorológicas asociadas con los valores máximos de PM<sub>10</sub> (que se evidencian en la tabla 8 análisis estadístico descriptivo), fueron vientos con velocidad mayor a 8.03 Km/h y con dirección predominante NNE - NEE. Las gráficas polares y el análisis de función de probabilidad condicional estimado con el paquete InfoStat relaciona directamente, con las

operaciones mineras desarrolladas en las explotaciones, aunque se registran aportes significativos de PM10 de fuentes regionales, no asociadas a la explotación de carbón.

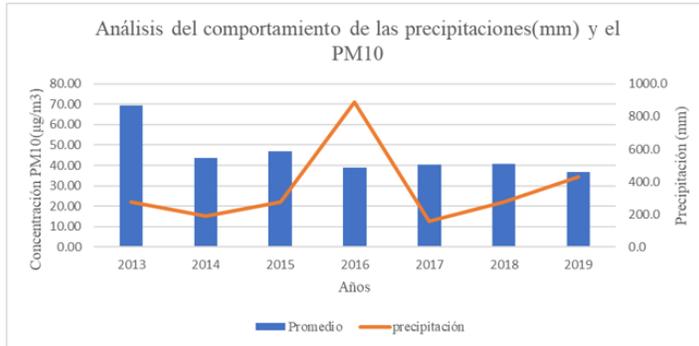


	Viento(m/s)	Viento (km/h)
Mínimo	0.01	0.036
Máximo	1.91	6.867
Promedio	1.36	4.885

Gráfica 3. Comportamiento de la dirección del viento. Fuente WRPLOT View-Genera Rosa de los vientos-IDEAM, SISAIRE 2013 al 2016



Las precipitaciones que presenta la guajira durante el año tienen a estar relacionadas con su posición geográfica el cual genera un clima semiárido en donde las precipitaciones llegan a tener un comportamiento mínimo de 106.20 mm y sus valores máximos están alrededor de 887.40 mm, partiendo de esto se puede deducir que en la Guajira se va a presentar muy pocas variaciones meteorológicas.



Parámetro	precipitación (mm/h)	T C°
Mínimo	106.20	24.3
Máximo	887.40	33.3
Promedio	160.30	28.6

Gráfica 4. Comportamiento de la precipitación en la Guajira. Fuente: IDEAM

Con el objetivo de medir la influencia que generan las actividades mineras en la explotación del carbón se realizó a través de la *gráfica 4* el cual es un análisis del comportamiento de las precipitaciones registradas a lo largo de los años y las concentraciones del material particulado PM<sub>10</sub>; conociendo que la lluvia cumple un papel muy importante en la limpieza de la atmósfera ya que a través de este proceso se remueve la mayor cantidad de contaminantes por el material particulado PM<sub>10</sub> y genera un control para las redes de monitoreo de calidad del aire.

Ahora bien, el promedio de las emisiones registradas entre los años 2013 a 2019 muestran que para el año 2013 fueron registrados los mayores valores por concentración de emisiones, correspondiente a las 8 estaciones activas que había para ese entonces en el departamento de la Guajira, con una medición promedio de 69.32 µg/m<sup>3</sup>, que según la Agencia Nacional Minera A.N.M. (2015), a causa del aumento en las exportaciones del carbón, la producción minera tuvo para este año un alza considerable, lo que generó un impacto ambiental en los parámetros de calidad de la medición.

Mientras que, para los siguientes años, la tendencia representa un aumento, ya que para el año 2016 contó con una medición promedio de 38.86(µg/m<sup>3</sup>) y en el 2017 fue de 40.45(µg/m<sup>3</sup>) y en 2018 de 40.89(µg/m<sup>3</sup>), causada por la reactivación de la producción.

En la *tabla 8* se evidencia la información por estaciones de los períodos 2013 al 2019. Arrojando un resultado anual de los promedios del  $PM_{10}$  con respecto a las estaciones de monitoreo de la calidad del aire con el fin de identificar la relación existente de las ocho estaciones y su afectación en los periodos analizado, arrojando que la estación de Hato Nuevo presentó un registro de  $73.83 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  siendo el más alto en todo el periodo analizado y la estación más afectada.

Durante el periodo de estudio se identificó que las estaciones de Albania, Barrancas, Cuestecitas, Hato Nuevo, Los remedios, Pacharoca, Papayal, Provincial, registraron un comportamiento promedio mínimo de  $27.80 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ ,  $42.82 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$  es el promedio más constante para los años 2014 al 2019.

*Tabla 8. Análisis anual promedio del  $PM_{10}$  con base a las estaciones por año Fuente: IDEAM*

<b>Estación/Año</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
Albania	59.55	39.64	45.20	38.83	34.42	39.15	33.41
Barrancas	53.02	40.71	42.21	46.46	39.86	31.99	35.10
Cuestecitas	49.25	37.42	42.29	34.22	33.18	33.19	34.05
Hato Nuevo	73.83	47.28	51.13	50.33	43.02	43.35	31.77
Los remedios	63.43	39.27	44.78	43.69	27.80	37.23	30.36
Pacharoca		47.31	44.11	50.87	38.88	36.02	38.00
Papayal	72.00	45.54	46.07	50.45	41.64	40.42	36.84
Provincial		40.62	42.09	35.41	45.98	49.36	40.31
Total, general	69.32	43.68	46.81	38.86	40.45	40.89	36.92

## 7.1 Descripción de las variables meteorológicas

La Guajira es la zona más seca de Colombia con un clima cálido, seco e inhóspito con registros bajos de precipitación equivalentes a 2 mm. Los procesos que influyen en el nivel de concentración de material particulado atmosférico están influenciados por las condiciones ambientales, ya que en estos se presentan procesos fundamentales como la dispersión y el lavado atmosférico. Estos son procedimientos que reducen o incrementan el material particulado, como lo es la lluvia, que genera el lavado atmosférico, ya que inhibe los procesos como la resuspensión; por otra parte evidenciamos que los niveles de material particulado atmosférico están relacionados con la inversión térmica, el cual es el aumento de la temperatura con la altitud, ya que en condiciones normales la temperatura disminuye con la altura, el fenómeno de inversión térmica, se presenta cuando en las noches despejadas la temperatura del suelos empieza a variar y este adquiere más densidad, al disminuir tanto la convección térmica como la subsidencia atmosférica disminuye la velocidad de mezclado, el cual es de carácter vertical entre las capas del aire.

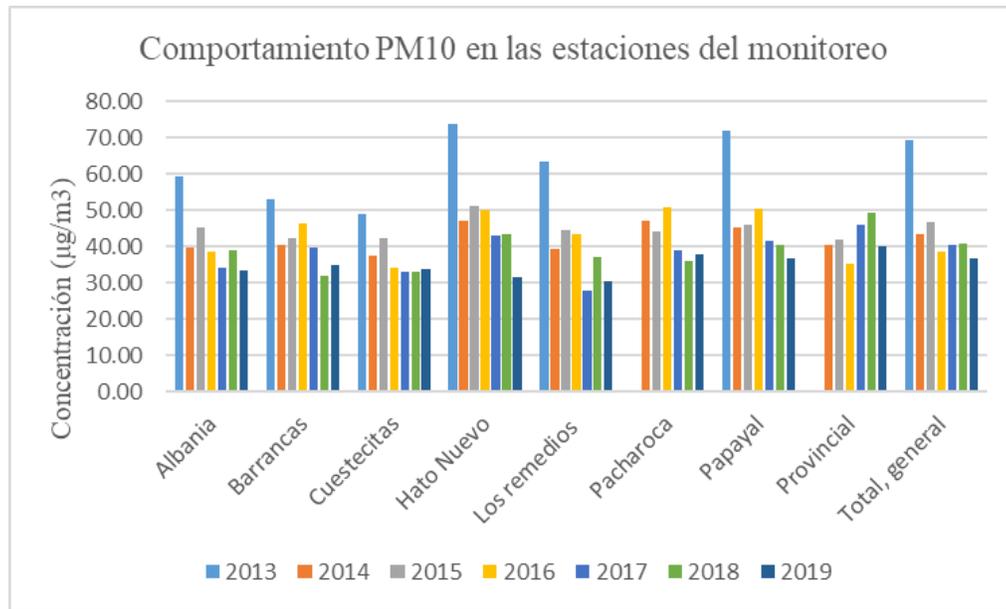
Los principales eventos que están asociados a los niveles altos o bajos de material particulado atmosférico son: Episodios Atlánticos que consisten en el transporte de masas de aire de la zona atlántica asociados a la evolución de vientos y pueden ir acompañados de pequeñas lluvias, también se evidencia eventos que se dan con alta frecuencia de precipitaciones, generando un efecto barrido en la atmósfera.

Para los eventos que ocasionan la elevación del material particulado, son caracterizados por temporadas secas ideales para la proliferación y generando una mayor disponibilidad de los contaminantes.

Se realiza durante los períodos del 2013 al 2019 el análisis de los comportamientos meteorológicos como se observa en la *tabla 9*.

Tabla 9. Análisis del consolidado de las variaciones meteorológicas en la zona minera con base a las estaciones por año Fuente: IDEAM.

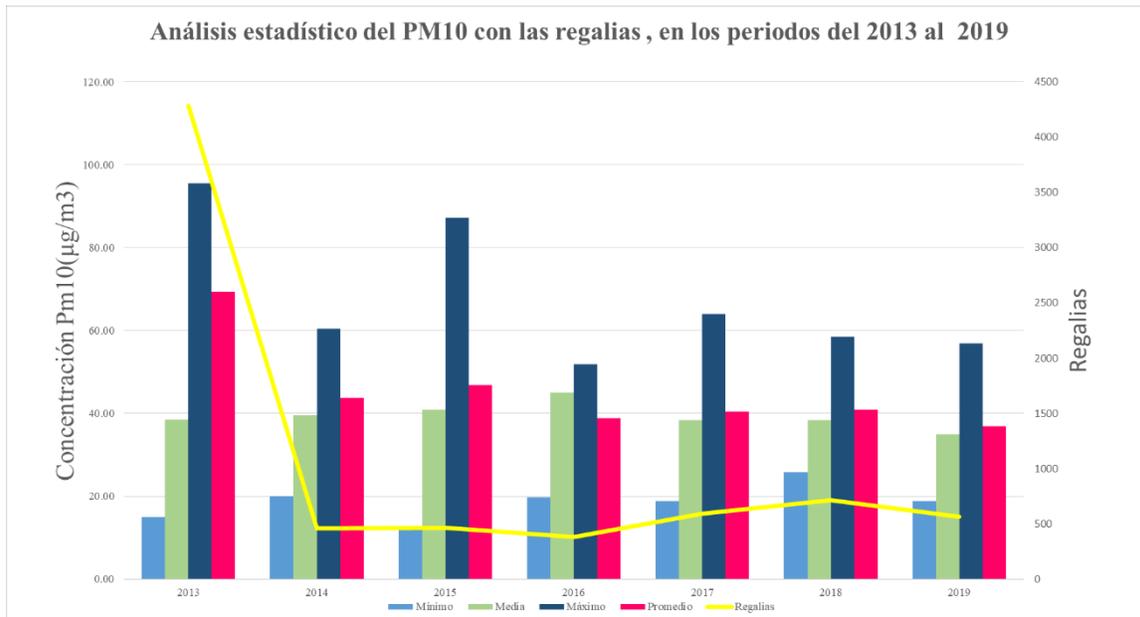
Parámetro	precipitación (mm/h)	T C°
Mínimo	106.20	24.3
Máximo	887.40	33.3
Promedio	160.30	28.6



Gráfica 5. Comportamiento en las estaciones de monitoreo  $PM_{10}$ , período 2013 al 2019.

Fuente IDEAM.

En la gráfica 5 se realizó la comparación del  $PM_{10}$  de las 8 estaciones en los períodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de  $PM_{10}$  se registraron en el año 2013 con un promedio de  $73.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Hato Nuevo, en la tabla 9 se identifica un consolidado promedio donde permite evidenciar los mínimos y máximos de las variables meteorológicas para lo cual se puede analizar la temporada seca, los picos más bajos presentaron un valor de  $31.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el periodo del 2018 ya que las precipitaciones en la zona a estudiar mantienen un promedio 160.30 mm.



*Gráfica 6. Análisis estadístico del PM10 con las regalías en el período 2013 al 2019.  
Fuente El Cerrejón*

En la *gráfica 6* se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> con las regalías suministradas por (Cerrejón minería responsable 2017) en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en los años 2013 con un promedio de 95.60 µg/m<sup>3</sup>.

En la *tabla 10* se presenta el análisis estadístico (media, mínima, máxima y promedio) realizado en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire durante los periodos del 2013 al 2019, con el fin de identificar cuál periodo registró valores máximos del material particulado PM<sub>10</sub>.

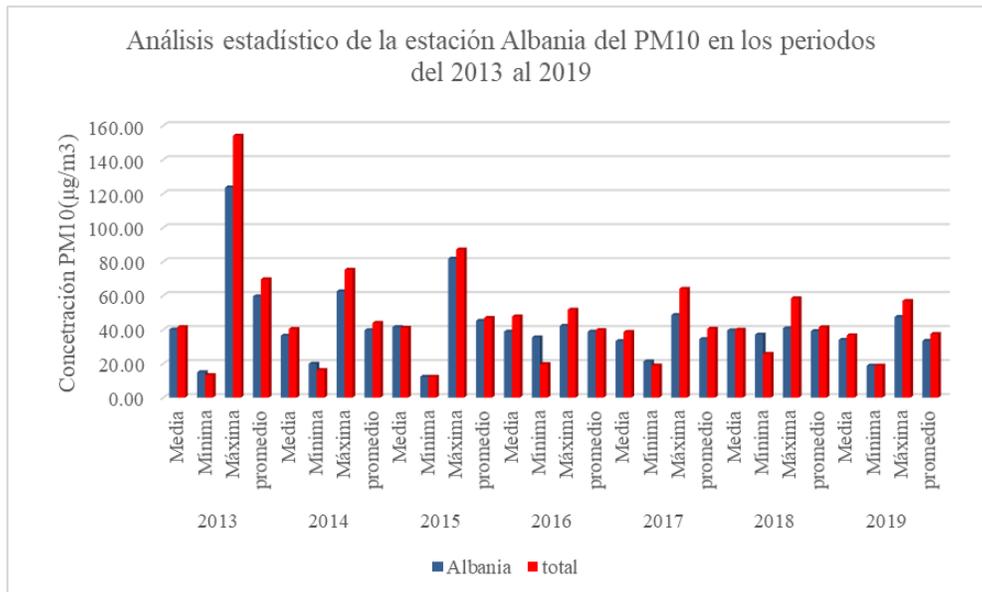
Tabla 10. Análisis anual estadístico del PM10 con base a las estaciones. Fuente: IDEAM

Estación	2013				2014			
	Media	Mínima	Máxima	promedio	Media	Mínima	Máxima	promedio
<b>Albania</b>	40.07	14.97	123.60	59.55	36.44	19.97	62.52	39.64
<b>Barrancas</b>	38.45	20.01	100.60	53.02	39.54	26.35	56.25	40.71
<b>Cuestecitas</b>	36.72	15.42	95.60	49.25	32.07	19.78	60.42	37.42
<b>Hato Nuevo</b>	45.31	23.19	153.00	73.83	44.67	26.25	70.92	47.28
<b>Los Remedios</b>	41.07	13.23	136.00	63.43	38.95	16.28	62.57	39.27
<b>Pacharoca</b>					43.45	23.26	75.22	47.31
<b>Papayal</b>	42.49	19.36	154.15	72.00	41.26	21.73	73.62	45.54
<b>Provincial</b>					39.54	24.06	58.26	40.62
<b>Total</b>	40.57	13.23	154.15	69.32	39.54	16.28	75.22	43.68

Estación	2015				2016			
	Media	Mínima	Máxima	promedio	Media	Mínima	Máxima	promedio
<b>Albania</b>	41.51	12.32	81.76	45.20	38.83	35.41	42.25	38.83
<b>Barrancas</b>	40.89	23.58	62.16	42.21	46.46	42.12	50.80	46.46
<b>Cuestecitas</b>	37.96	21.97	66.95	42.29	34.22	30.12	38.31	34.22
<b>Hato Nuevo</b>	46.06	20.12	87.20	51.13	50.33	49.48	51.18	50.33
<b>Los Remedios</b>	40.93	20.14	73.28	44.78	43.69	39.29	48.08	43.69
<b>Pacharoca</b>	39.57	21.83	70.93	44.11	50.87	49.95	51.78	50.87
<b>Papayal</b>	41.33	26.36	70.53	46.07	50.45	49.83	51.07	50.45
<b>Provincial</b>	40.62	21.89	63.76	42.09	35.81	19.71	50.71	35.41
<b>Total</b>	40.91	12.32	87.20	46.81	45.08	19.71	51.78	38.86

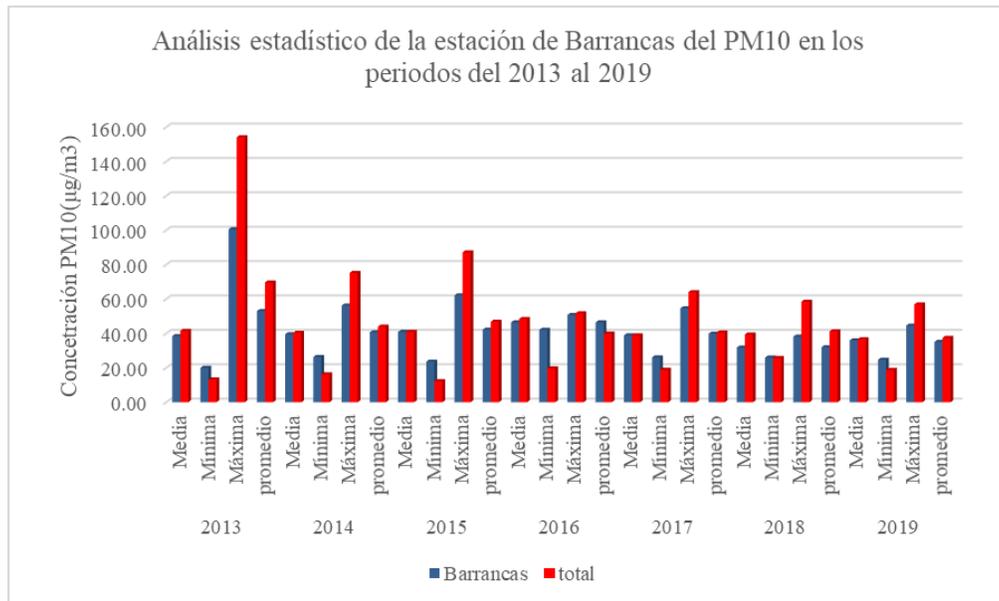
<b>Estación</b>	<b>2017</b>				<b>2018</b>			
	<b>Media</b>	<b>Mínima</b>	<b>Máxima</b>	<b>promedio</b>	<b>Media</b>	<b>Mínima</b>	<b>Máxima</b>	<b>promedio</b>
<b>Albania</b>	33.30	21.34	48.63	34.42	39.56	37.09	40.80	39.15
<b>Barrancas</b>	38.89	26.07	54.62	39.86	31.82	25.97	38.17	31.99
<b>Cuestecitas</b>	30.57	22.62	46.35	33.18	34.13	25.79	39.64	33.19
<b>Hato Nuevo</b>	42.42	31.64	55.00	43.02	43.56	35.47	51.02	43.35
<b>Los Remedios</b>	27.62	18.89	36.90	27.80	37.29	26.42	47.98	37.23
<b>Pacharoca</b>	37.96	24.98	53.71	38.88	36.12	30.39	41.55	36.02
<b>Papayal</b>	38.87	22.03	64.03	41.64	40.44	36.50	44.31	40.42
<b>Provincial</b>	42.88	31.02	64.03	45.98	51.10	38.53	58.46	49.36
<b>Total</b>	38.42	18.89	64.03	40.45	38.43	25.79	58.46	40.89

<b>2019</b>				
<b>Estación</b>	<b>Media</b>	<b>Mínima</b>	<b>Máxima</b>	<b>promedio</b>
<b>Albania</b>	34.00	18.80	47.43	33.41
<b>Barrancas</b>	36.04	24.71	44.55	35.10
<b>Cuestecitas</b>	33.65	25.76	42.73	34.05
<b>Hato Nuevo</b>	30.50	22.35	42.45	31.77
<b>Los Remedios</b>	29.82	20.28	40.98	30.36
<b>Pacharoca</b>	36.89	28.99	48.11	38.00
<b>Papayal</b>	36.37	27.55	46.60	36.84
<b>Provincial</b>	40.02	23.97	56.94	40.31
<b>Total</b>	35.02	18.80	56.94	36.92



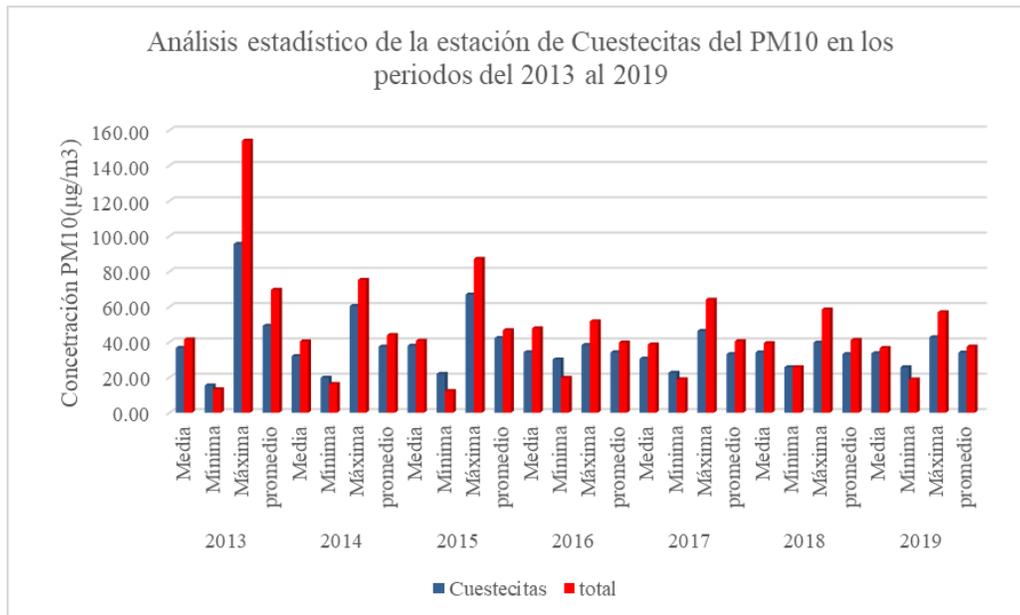
*Gráfica 7. Análisis estadístico de la estación de Albania del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES*

En la *gráfica 7* se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Albania en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2013 con un promedio de 123.60 µg/m<sup>3</sup>, los picos más bajos de dichos valores con un promedio de 12,32 µg/m<sup>3</sup>.



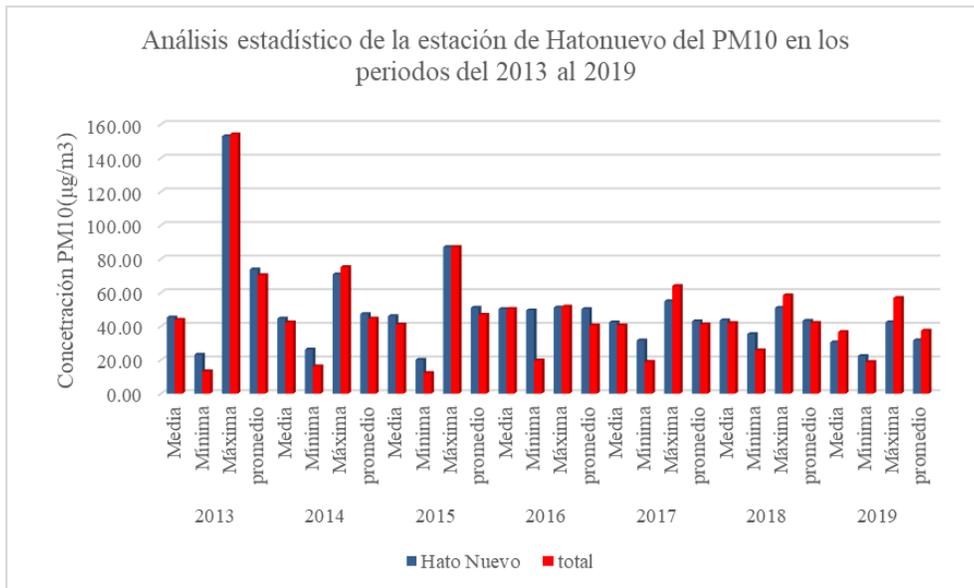
Gráfica 8. Análisis estadístico de la estación de Barrancas del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES

En la gráfica 8 se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Barrancas en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2013 con un promedio de 100.60 µg/m<sup>3</sup> y así mismo se presentaron en ese mismo periodo con un promedio de 20.01 µg/m<sup>3</sup>.



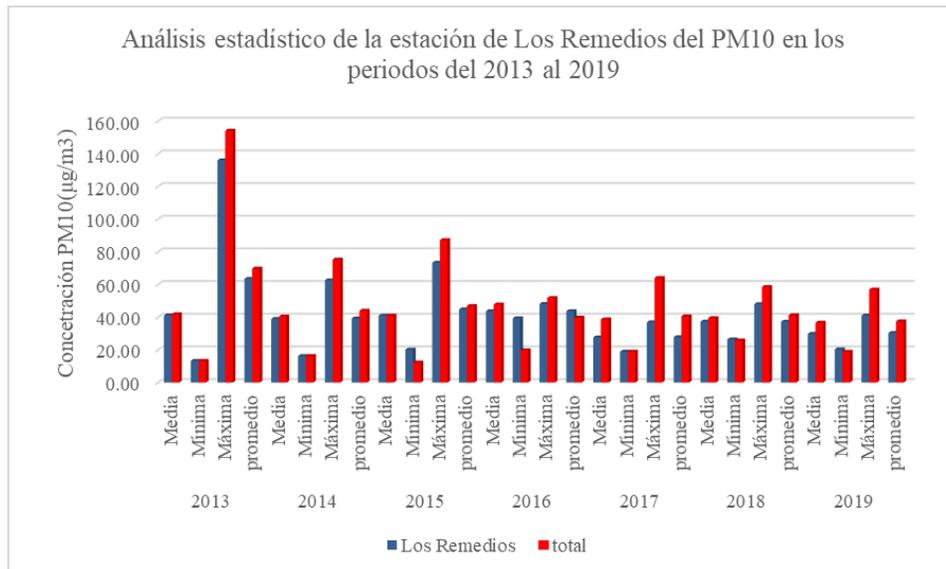
*Gráfica 9. Análisis estadístico de la estación de Cuestecitas del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES*

En la *gráfica 9* se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Cuestecitas en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2013 con un promedio de 95.60 µg/m<sup>3</sup> y así mismo se presentaron en ese mismo periodo con un promedio de 15.63 µg/m<sup>3</sup>.



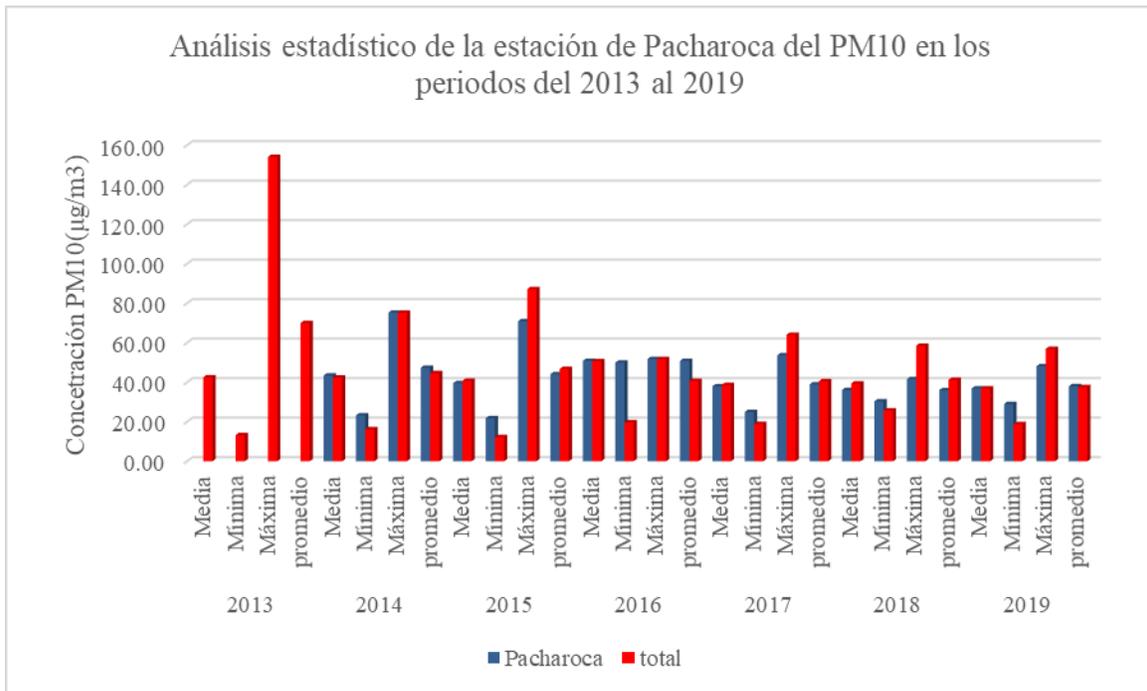
Gráfica 10. Análisis estadístico de la estación de Hato Nuevo del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES.

En la gráfica 10 se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Hato Nuevo en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2013 con un promedio de 153.30 µg/m<sup>3</sup>, los picos más bajos en el periodo del 2015 con un promedio de 20,12 µg/m<sup>3</sup>.



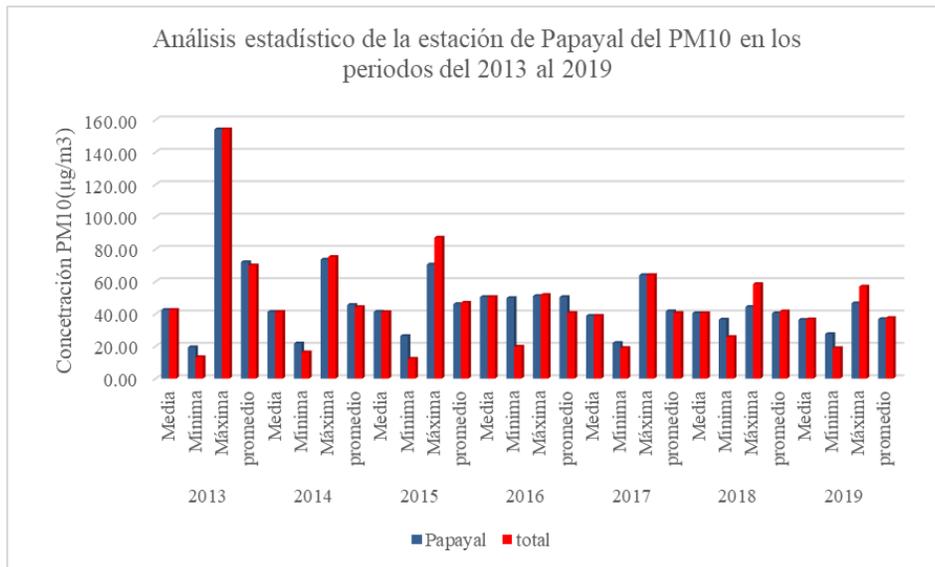
Gráfica 11. Análisis estadístico de la estación de Los Remedios del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRE.

En la gráfica 11 se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Hato Nuevo en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2013 con un promedio de 136 µg/m<sup>3</sup> y los picos más bajos un promedio de 13,23 µg/m<sup>3</sup>.



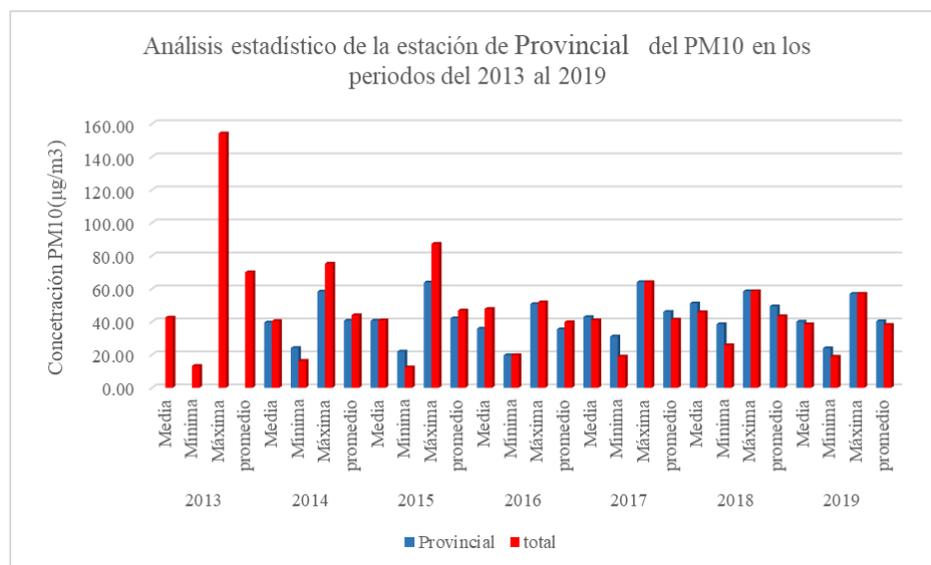
Gráfica 12. Análisis estadístico de la estación de Pacharoca del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES.

En la *gráfica 12* se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Pacharoca en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2014 con un promedio de 75.22 µg/m<sup>3</sup> y los picos más bajos se registraron en el periodo 2015 con un promedio de 21.83 µg/m<sup>3</sup>.



Gráfica 13. Análisis estadístico de la estación de Papayal del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES.

En la gráfica 13 se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Papayal en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2013 con un promedio de 154.15 µg/m<sup>3</sup> y los picos más bajos un promedio de 19,36 µg/m<sup>3</sup>.



Gráfica 14. Análisis estadístico de la estación de Provincial del PM10 en los periodos del 2013 al 2019. Fuente SISAIRES.

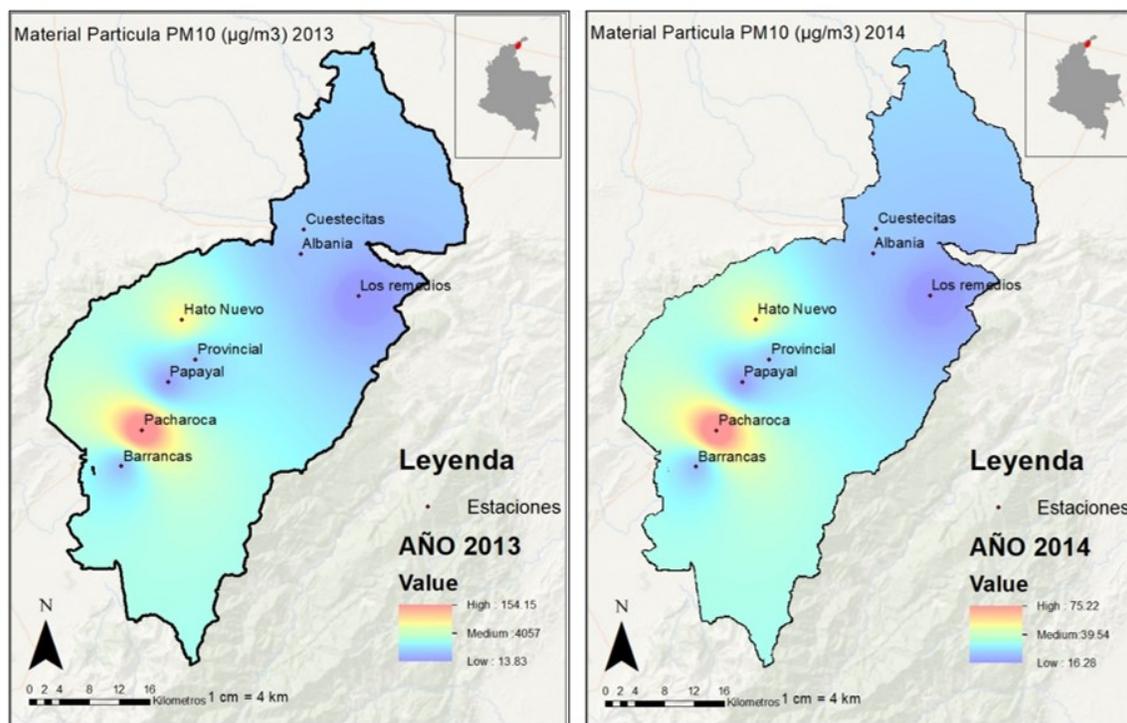
En la *gráfica 14* se realizó la comparación del PM<sub>10</sub> de la estación de Provincial en los periodos 2013 al 2019, los picos más altos de la concentración de PM<sub>10</sub> se registraron en el periodo 2017 con un promedio de 64.03 µg/m<sup>3</sup> y los picos más bajos se registraron en el periodo 2016 con un promedio de 19.71 µg/m<sup>3</sup>.

Por medio de este análisis estadístico, se evidenció que en el periodo 2013 y 2015 obtuvieron un valor significativo aportando una mayor generación de material particulado en las estaciones evaluadas. Así mismo, los periodos del 2014 y 2016 presentaron valores menos significativos del material particulado y para los periodos del 2017 al 2019 presentó una constante de emisión del material particulado.

## **7.2 Análisis espacial**

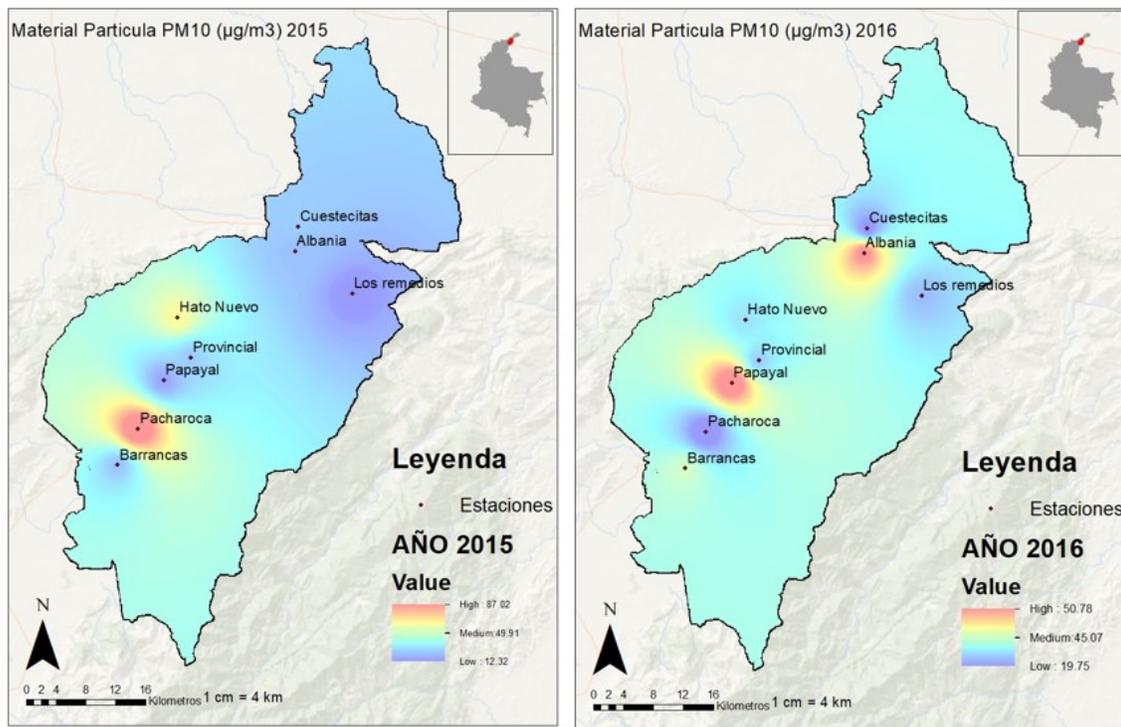
El objetivo del análisis espacial es describir el comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> µg/m<sup>3</sup> en el territorio en estas se encontrarán el registro de las estaciones y como es el comportamiento de las emisiones atmosféricas a nivel espacial.

Al igual se identificaron los valores máximos y mínimos registrados para cada estación comparados con las regalías obtenidas en los periodos evaluados, evidenciado cómo el comportamiento del material particulado presenta un incremento debido al aumento de producción minera de carbón y relacionada con la variación meteorológica (evidenciado en la gráfica 6), indicando por medio de los análisis espaciales el comportamiento que tuvo las concentraciones del material particulado por año y por estación, así se identificó la variación que se obtuvo a lo largo del tiempo de la siguiente manera.



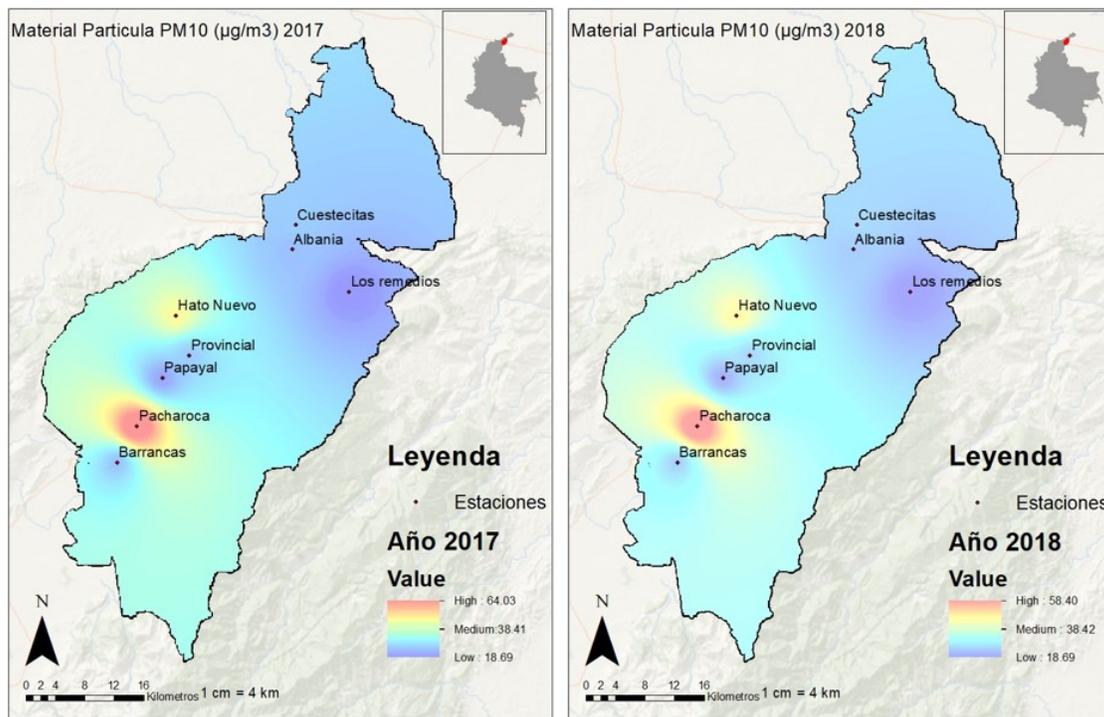
*Figura 3. Comportamiento espacial del material particulado PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período 2013 y 2014. Fuente propia*

En la *figura 3* se registraron valores máximos en el comportamiento de los contaminantes emitidos durante los períodos 2013 y 2014 en las estaciones de Pacharoca con un valor de  $155.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el 2013 y para el 2014 tuvo un valor de  $75.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  estos valores pueden estar variado por las variables meteorológicas mencionadas en la Tabla 9. Análisis del consolidado de las variaciones meteorológicas en la zona minera con base a las estaciones por año.



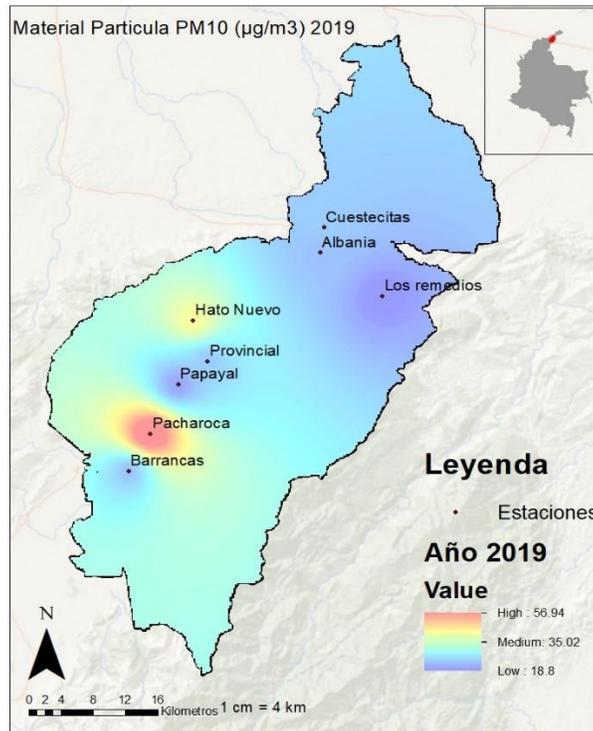
*Figura 4. Comportamiento espacial del material particulado PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período 2015 y 2016. Fuente propia*

Siguiendo con la descripción espacial de las estaciones atmosféricas para los años evaluados entre el 2015 y 2016 como se observa en la *figura 4*, las concentraciones del material particulado fueron muy similares en la estación meteorológica de Cuestecitas, los Remedios y Albania, registrando un rango entre los  $12.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $19.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . exceptuando que en la estación de Pacharoca para el periodo del 2015 registra un valor máximo de  $87.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante estos períodos sus producciones de este mineral no tuvieron grandes impactos ambientales.



*Figura 5. Comportamiento espacial del material particulado PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período 2017 y 2018. Fuente propia*

En la *figura 5* se identifican las estaciones de Hatonuevo se evidenció un comportamiento máximo registrando valores entre  $64.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica que para el período del 2017 se incrementó la producción y extracción del mineral del carbón el cual fue de 37% mayor al índice de generación de producción minera como lo indicó la Agencia nacional minera. Durante el período 2018 se identificó las concentraciones registradas por las estaciones de Cuestecitas, registrando comportamientos máximos de  $58.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$



*Figura 6. Comportamiento espacial del material particulado PM10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante el período 2019. Fuente propia*

Para nuestro último caso de análisis estadístico (*figura 6*), se identificó que el comportamiento del material particulado, ya no representa un nivel de concentraciones de contaminantes atmosféricos emitidos, por ende el registro de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire reportan las concentraciones de PM<sub>10</sub> por debajo de la resolución Colombia en el tema de calidad y monitoreo del aire, estas variaciones se identifican en las estaciones de Los Remedios, Albania, Cuestecita y Papayal, con valores alrededor de los 35.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . exceptuando que para la estación de Pacharoca tuvo un registro de 56.94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 8. Discusión

El objetivo del análisis estadístico fue determinar el comportamiento de las emisiones del material particulado PM<sub>10</sub> en el complejo minero, ubicado en el norte de Colombia, donde se puede concluir que las concentraciones ambientales de PM<sub>10</sub> en los períodos de 2013 al 2018, representan un riesgo hacia las poblaciones más vulnerables, ya que estas generaciones de emisiones atmosféricas sobrepasan el límite permisible 50 (µg/m<sup>3</sup>) decretado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible decreto 2257 del 2017 en donde se establecen los lineamientos normativos de los niveles de inmisión. Así mismo en el periodo 2019 se evidencia una mejora en el comportamiento del material particulado en cuatro estaciones, mostrando concentraciones de PM<sub>10</sub> por debajo de la resolución Colombia en el tema de calidad y monitoreo del aire.

Los resultados de los modelos de dispersión y transporte de las concentraciones de PM<sub>10</sub> de una o varias fuentes incluyendo los efectos meteorológicos. Las variables de entrada al modelo están constituidas por los datos meteorológicos (evidenciados tabla 9 y10), información de emisiones de la fuente e información de los receptores El cual tiene repercusiones en el ámbito ambiental, llegando a generar impactos sociales, culturales, económicos y de salud pública.

*Tabla 11. Análisis estadístico descriptivo. Fuente Autor.*

Parámetro	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Mínimo	14.97 (µg/m <sup>3</sup> )	19.97 (µg/m <sup>3</sup> )	12.32 (µg/m <sup>3</sup> )	19.71 (µg/m <sup>3</sup> )	18.89 (µg/m <sup>3</sup> )	25.79 (µg/m <sup>3</sup> )	18.80 (µg/m <sup>3</sup> )
Media	38.45 (µg/m <sup>3</sup> )	39.54 (µg/m <sup>3</sup> )	40.91 (µg/m <sup>3</sup> )	45.08 (µg/m <sup>3</sup> )	38.42 (µg/m <sup>3</sup> )	38.43 (µg/m <sup>3</sup> )	35.02 (µg/m <sup>3</sup> )
Máximo	95.60 (µg/m <sup>3</sup> )	60.42 (µg/m <sup>3</sup> )	87.20 (µg/m <sup>3</sup> )	51.78 (µg/m <sup>3</sup> )	64.03 (µg/m <sup>3</sup> )	58.46 (µg/m <sup>3</sup> )	56.94 (µg/m <sup>3</sup> )
Promedio	69.32 (µg/m <sup>3</sup> )	43.68 (µg/m <sup>3</sup> )	46.81 (µg/m <sup>3</sup> )	38.86 (µg/m <sup>3</sup> )	40.45 (µg/m <sup>3</sup> )	40.89 (µg/m <sup>3</sup> )	36.92 (µg/m <sup>3</sup> )
Error típico	1.50 %	0.00 %	0.00 %	8.75 %	2.00 %	8.13 %	5.50 %

En la *tabla 11* se presentan los resultados obtenidos de los registros de las ocho estaciones de monitoreo de la calidad del aire durante los periodos del 2013 al 2019, para llevar a cabo

este análisis se descargó de la página de SISARIE y se clasificó por estaciones, meses y años, indicando los siguientes resultados; el año que presentó más material particulado fue el 2013 con un 95.60 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y el año que presentó menos material particulado fue el 2015 con un 12.32 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), lo puede ser influencia por los factores económicos y temporadas altas de producción; tuvieron un error típico del 1.50% para el 2013, que puede ser afectado por las condiciones del clima y la generación de los vientos, ya que en la zona de estudio se presenta un clima semidesértico que favorece a la repercusión de las partículas en el aire (Castillo. F 2016).

Por lo tanto, este método analítico permite generar las estimaciones de año a año de la dispersión de los contaminantes emitidos, en donde se puede constatar que las estaciones ambientales registran un promedio a lo largo del tiempo y monitorea el comportamiento de las emisiones atmosféricas, como se indica en la *tabla 8*, la cual muestra el promedio de las concentraciones emitidas en los períodos a evaluar, estas estaciones se encuentran cercanas a los municipios ubicado en el proyecto minero, el comportamiento de las emisiones atmosféricas se ve relacionado con las condiciones meteorológicas de la zona (como se indica en la *gráfica 3*), ya que se encuentra con una alta presencia de viento con un máximo de 6.867 (km/h) y un mínimo de 0.036(km/h), y tiene una tendencia hacia la dirección NE y generan la propagación del  $\text{PM}_{10}$ , repercutiendo un gran potencial para la generaciones de enfermedades; así mismo, se va reflejando los reportes de la Agencia Nacional Minera indicando cuales son los impactos económico que genera la extracción de minería a cielo abierto.

Por otra parte, se puede observar que el análisis descriptivo permite evidenciar el error típico del 8.76% para el 2016 (evidenciada en la *tabla 11*) y este puede ser afectado por las condiciones del clima y la generación de los vientos, ya que en la zona de estudio se presenta un clima semidesértico que favorece a la repercusión de las partículas en el aire

Todos los estudios fueron observacionales y descriptivos, los cuales estuvieron relacionadas principalmente con la evaluación de los niveles de contaminación  $\text{PM}_{10}$ , en la

población de minera de la Guajira, la percepción de daños a la salud con la actividad minera de carbón, el deterioro del suelo, la generación de la mala calidad del aire y el no cumplimiento de la Resolución 2254 del 2017 de la calidad del aire decretada por el Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Es necesario seguir construyendo metodologías de análisis, que permitan hacer estudios detallados de emisiones y modelos de dispersión en el aire que sean generados automáticamente y sin errores por medio de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, teniendo en cuenta las fuentes de las variables meteorológicas como lo son las precipitaciones, temperaturas y los registros de algunas estaciones que pueden llegar a perder la información recolectada generando vacíos para la adecuación de los análisis a realizar, ya sean de manera estadística y/o espacial.

Se estudiaron la variabilidad espacial y temporal de  $PM_{10}$  durante el período comprendido entre 2013 al 2019 en la mina de carbón a cielo abierto (Agencia Nacional Minera) ubicada en el noreste de Colombia. Los resultados mostraron concentraciones promedio de  $PM_{10}$  de  $69.32 (\mu g m^{-3})$  siendo el más alto registrado durante el estudio. Así mismo, se observó que las condiciones meteorológicas asociadas con los valores máximos de  $PM_{10}$  (que se evidencian en la tabla 8 análisis estadístico descriptivo), fueron vientos con velocidad mayor a  $8.03 \text{ Km/h}$  y con dirección predominante NNE - NEE. Las gráficas polares y el análisis de función de probabilidad condicional estimado con el paquete InfoStat relaciona directamente, con las operaciones mineras desarrolladas en las explotaciones, aunque se registran aportes significativos de  $PM_{10}$  de fuentes regionales, no asociadas a la explotación de carbón; mediante a los estudios previos consultados sobre el desarrollo de los análisis estadísticos y espaciales se evidencio que para (Roberto, Arregocés, Angulo , & Restrepo, 2018) Las concentraciones de TSP y  $PM_{10}$  varían a lo largo del año. Los valores promedio más altos se obtuvieron durante la temporada seca. El comportamiento entre los picos de TSP y  $PM_{10}$ , indica que las emisiones de polvo son de fuentes similares y locales. Tres de las cinco estaciones, mostraron tendencias de aumento en las concentraciones de  $PM_{10}$ . Solo se observó correlación significativa entre la velocidad del viento y las

concentraciones de TSP y PM10. Para el material particulado PM10 no fueron superados los niveles diario y anual de la norma colombiana.

## 9. Conclusiones

Mediante las evaluaciones de la distribución espacial del material particulado, se evidencia que el análisis temporal estadístico, género un comportamiento en algunas estaciones de monitoreo superando los límites máximos permisibles para los períodos evaluados, analizando el comportamiento del material particulado en los años del 2013 al 2019 e identificando la problemática del deterioro de la calidad del aire, que a su vez se ve relacionado con las variables meteorológicas que generen un comportamiento hacia las distribuciones del material particulado emitido hacia la atmósfera.

- Se identificó el comportamiento de la cantidad del material particulado (PM<sub>10</sub>) en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  registrados por las plataformas de SISAIRES, se determina que se sobrepasa límites máximos permisibles en los períodos anuales.
- Por medio de los resultados se identificó la problemática para el área de estudio, por lo cual se concluye que por la normativa Colombia en cuanto al tema de calidad del aire en la zona de estudio debe incorporar un control y revisión de su nivel para no generar un máximo sobrepaso del material PM<sub>10</sub>.
- Con base a los gráficos del comportamiento del material particulado, se observó registros altos que superan los valores permitidos bajo la normatividad Colombia, en temas de calidad del aire, se determina que las relaciones entre las condiciones meteorológicas Temperatura, Precipitación, tiene una influencia significativa, ya que los grados de correlaciones son considerablemente altos y de acuerdo con los análisis temporales, se generan una mayor influencia en la variación de las concentraciones del (PM<sub>10</sub>) a la fuente fija, que se encuentran situadas en el área de estudio.
- Por medio de los análisis temporales se pudo concluir que el comportamiento del material particulado a lo largo de los años presenta un incremento de producción y tienden a relacionarse con las precipitaciones (mm), Temperaturas (°C), lo cual

generan una influencia en su disminución, como se puede apreciar en los gráficos de comportamiento del material particulado (PM<sub>10</sub>).

- Mediante el análisis estadístico temporal de las concentraciones que fueron emitidas se evidencia los años que tuvo mayor registro de emisiones, lo que genera un apoyo para el sector económico por el aumento de la producción, pero a su vez podemos observar el desequilibrio ambiental por el deterioro no solo de la calidad del aire sino de su entorno ambiental.

## 8. Lista de referencias

- Alfonso, A. R. (2016). Análisis de la Relación entre el Pm10 y las infecciones respiratorias en el sector minero de la baja Guajira Colombia. *Universidad de Antioquia*, 2.
- CAMACHO, A. (2012). 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. *Pontificia Universidad Javeriana*, 7-9.
- Pabón, P. (2010). Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá D.C. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Hayas, B. (1991). Meteorología y Contaminación Atmosférica. Peculiaridades de la zona urbana de Jaén. 192.
- Vargas, R. F. (2019). Informe anual sobre derecho Humanos en Chile 2019. *Universidad Diego Portales*, 497-500.
- Rosa, O. (2007). Introducción a los sistemas de información Geográfica. *Universidad Oberta Catalunya*.
- Cabrera. (2012). *Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica*.
- Ignacio, T. L. (2012). Guía para el uso de modelos calidad del aire. *SEIA Servicio de evaluación Ambiental*.
- Wong, D. &. (2005). *Statical analysis of Geographic information with ArcView GIS and ArcGIS*. Obtenido de Google Académico:  
[https://scholar.google.com.co/scholar?q=statistical+analysis+of+geographic+information&hl=es&as\\_sdt=0&as\\_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com.co/scholar?q=statistical+analysis+of+geographic+information&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart)
- geografía, I. N. (2014). *Instituto nacional de estadística y Georreferencia*. México.
- Silva, A. &. (07 de sep. de 2016). *Modelado de la dispersión de material particulado en la ciudad de Los Ángeles (Chile) a partir de las estufas a leña en el período de invierno usando AERMOD*. Obtenido de  
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n20/art04.pdf>:

- Cazorla, L. (2014). Determinación de concentraciones y flujos atmosféricos de metales pesado radionucleidos de interés ambiental en deposiciones atmosféricas totales. *Cubana de Química Vol. XXV 2013*, 4.
- Minería, A. N. (2018). *Minería en la Guajira*. Bogotá: UPME.
- Albarrán. (2009). *Distribución espacial de la contaminación por material particulado y su relación con las temperaturas del aire y los vientos en Santiago*. Santiago de Chile.
- Aneja, V. P. (2012). Characterization of particulate matter (PM10) related to surface coal mining operations in Appalachia. *Elsevier*, 1-2.
- Curriero, F. C. (2013). The contextual influence of coal abandoned mine lands in communities and type 2 diabetes in Pennsylvania. *Johns Hopkins University*.
- Heli A. Arregocés, R. E. (2016). Predicción y Análisis de la contribución de PM10 desde pilas de carbón en una mina a cielo abierto. *Scielo. Conicyt*, 2-3.
- Arregocés, H. A. (2016). *Análisis de la relación entre el Pm10 y las infecciones respiratorias en el sector minero de la baja Guajira Colombiana*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- IDEAM, f. M. (2014). *IDEAM*. Obtenido de IDEAM:  
<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/emisiones-por-fuentes-fijas>
- Paredes, P. (2013). *¿Después de la minería qué?* Ecuador: Facultad latinoamericana de ciencias sociales.
- Martínez, A. (2013). *Estudio sobre los impactos socioeconómicos del sector minero en Colombia*. Bogotá: Fedesarrollo.
- Hoyos, E. A. (2016). *Impacto ambiental y Social de la minería a cielo abierto con maquinaria pesada en el municipio de Condoto, Departamento del Chocó a partir del año 200*. Quibdó -Chocó: Facultad de ciencias Sociales y Humanas - Universidad de Medellín.
- Siva, P. (2015). *Environmental Aspects and Impacts Its Mitigation Measures of Corporate Coal Mining*. Visakhapatnam- India: Procedia Earth And Planetary Science.
- Lillo, J. (2014). *Impactos de la minería en el medio Natural*. Móstoles, España: Grupo de Estudios en Minería y Medioambiente.

Cardenal, L. (2013). *Contaminación Atmosférica*. Canadá: Natural Resources Defense Council.

Arrieta, A. (2016). *Dispersión de material particulado (pm10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos*. Tunja- Boyacá: Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia.

Oyarzun, G. (2010). *Contaminación aérea y sus efectos en la salud*. Santiago de Chile - Chile: Revista chilena de enfermedades respiratorias.