

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CAMBIOS EN LA CALIDAD  
DEL AIRE MEDIANTE ANÁLISIS MULTITEMPORAL, EN LAS ESTACIONES DE  
RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE CRUDO ACACÍAS, CASTILLA I, CASTILLA II Y  
CHICHIMENE DE ECOPETROL S.A. DURANTE EL PERIODO 2013-2016.

GLENNY LORENA DE LOS ANGELES VIVAS LA ROTTA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2018

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE CAMBIOS EN LA CALIDAD  
DEL AIRE MEDIANTE ANÁLISIS MULTITEMPORAL, EN LAS ESTACIONES DE  
RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE CRUDO ACACÍAS, CASTILLA I, CASTILLA II Y  
CHICHIMENE DE ECOPETROL S.A. DURANTE EL PERIODO 2013-2016.

GLENNY LORENA DE LOS ANGELES VIVAS LA ROTTA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental.

Asesor

Esp YURY TATIANA CARDENAS HERNANDEZ

Ingeniera Química

Especialista Ingeniería Ambiental.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
VILLAVICENCIO

2018

**Autoridades académicas**

**P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA O.P**

Rector General

**P. MAURICIO ANTONIO CORTES GALLEGO O.P**

Vicerrector Académico General

**P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO O.P**

Rector Sede Villavicencio

**P. FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaría de División Sede Villavicencio

**YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

**YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**

Decana de la Facultad

---

**YURY TATIANA CÁRDENAS HERNÁNDEZ**

Director Trabajo de Grado

---

**YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN**

Jurado

---

**CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA**

Jurado

Villavicencio, 29 de junio de 2018.

## DEDICATORIA

*A Dios, por su infinita bondad y amor, por darme la fortaleza y sabiduría para culminar mi carrera, por estar conmigo en cada paso que doy, por haber puesto en mi camino a las personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio. Por todas las bendiciones diarias, a Dios gracias.*

*A mi bella madre, por su tenacidad y fortaleza, por su coraje y decisión de sacarnos adelante, por su apoyo y gran amor, por la motivación constante que me permitió el desarrollo de mi carrera.*

*A mi amado padre, por su infinita bondad y amor, por amarme todo el tiempo, por su apoyo y dedicación, por ser el pilar fundamental de todo lo que soy.*

*A mi querido novio, por su comprensión y cariño, por su colaboración y amor en todos estos años juntos.*

*A mi abuelita linda, por ser luz en mi vida, porque su nobleza y dedicación me conmueve el alma, porque su cuidado en mi vida ha hecho de mí una gran mujer.*

*A mis familiares que han participado directa e indirectamente en el desarrollo de mi carrera profesional, especialmente mis tías Alba y Nohemy por brindarme su apoyo incondicional.*

*Y a todos mis amigos que me han apoyado y han hecho parte de mi vida, este trabajo de grado va dedicado a todos ellos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Mis más sinceros agradecimientos van dirigidos al equipo HSE de Ecopetrol S.A por la confianza que me brindaron y por su colaboración para la realización de este proyecto.*

*A mi directora de grado, la ingeniera Yury Tatiana Cárdenas Hernández, porque sus conocimientos y sugerencias hicieron posible la estructuración, ejecución y finalización de este proyecto.*

*A la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, la Facultad de Ingeniería Ambiental y a todos los profesores que con sus conocimientos, apoyo y orientación hicieron parte de mi formación profesional.*

## Tabla de Contenido

|  |    |
|--|----|
| Resumen.....   | 14 |
| Introducción.....  | 15 |
| 1. Planteamiento del problema.....   | 17 |
| 2. Objetivos.....  | 19 |
| 2.1 Objetivo General.....  | 19 |
| 2.2 Objetivos Específicos.....   | 19 |
| 3. Justificación.....  | 20 |
| 4. Alcance.....  | 22 |
| 5. Antecedentes.....   | 25 |
| 6. Marco de referencia.....  | 28 |
| 6.1 Marco Teórico.....   | 28 |
| 6.2 Marco Conceptual.....  | 32 |
| 6.3 Marco Legal.....   | 35 |
| 7. Metodología.....  | 39 |
| 7.1 FASE I: Identificación, validación y recopilación de variables de estudio..... | 40 |
| 7.1.1 Validación de los datos.....   | 40 |
| 7.1.2 Definir compuesto para analizar.....   | 41 |
| 7.1.3 Definir variables meteorológicas.....  | 41 |
| 7.1.4 Información complementaria para el estudio.....                              | 42 |
| 7.2 FASE II: Análisis estadístico y multitemporal de la información.....           | 43 |
| 7.2.1 Análisis estadístico.....  | 44 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 7.2.2 | Análisis multitemporal.....  | 45 |
| 7.3   | FASE III: Consolidación de la propuesta metodológica.....  | 48 |
| 8.    | Resultados: y Análisis de Resultados .....   | 50 |
| 8.1   | FASE I: Identificación, validación y recopilación de las variables de estudio.....                                       | 50 |
| 8.1.1 | Validación de la información secundaria.....   | 50 |
| 8.1.2 | Estructura de la base de datos. ....   | 51 |
| 8.1.3 | Información preliminar del área de estudio. ....   | 53 |
| 8.2   | FASE II: Análisis estadístico y multitemporal de la información .....  | 64 |
| 8.2.1 | Análisis estadístico para la estación Acacías.....   | 64 |
| 8.2.2 | Análisis multitemporal a partir del software R de la Estación Acacías:.....  | 68 |
| 8.2.3 | Análisis estadístico Estación Chichimene. ....   | 71 |
| 8.2.4 | Análisis multitemporal a partir del software R de la Estación Chichimene. ....   | 73 |
| 8.2.5 | Análisis estadístico Estación Castilla I: .....  | 76 |
| 8.2.6 | Análisis multitemporal a partir del software R de la Estación Castilla I. ....   | 78 |
| 8.2.7 | Análisis estadístico Estación Castilla II.....   | 81 |
| 8.2.8 | Análisis multitemporal Estación Castilla II. ....  | 83 |
| 8.2.9 | Análisis de SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> para las estaciones Acacías, Chichimene, Castilla I y<br>Castilla II:..... | 86 |
| 8.3   | FASE III: Consolidación de la propuesta metodológica.....  | 88 |
| 8.3.1 | Definición del área de estudio.....  | 90 |
| 8.3.2 | Recopilación de información preliminar .....   | 90 |
| 8.3.3 | Periodo de tiempo a evaluar.....   | 92 |
| 8.3.4 | Determinación de parámetros a evaluar.....   | 92 |
| 8.3.5 | Consolidación de la base de datos .....  | 92 |
| 8.3.6 | Análisis estadístico y multitemporal.....  | 93 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| Conclusiones .....                | 100 |
| Recomendaciones y discusión ..... | 102 |
| Referencias Bibliográficas.....   | 103 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Localización estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral Campo Castilla – Chichimene. ....                     | 22 |
| Figura 2: Diagrama metodológico. ....   | 40 |
| Figura 3: Identificación de variables de estudio. ....  | 43 |
| Figura 4: Aplicación de estadística descriptiva. ....   | 45 |
| Figura 5. Rosa de vientos para las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Chichimene, Castilla I, Castilla II, año 2015.. .... | 57 |
| Figura 6: Rosa de vientos para las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Chichimene, Castilla I, Castilla II, año 2016.. .... | 58 |
| Figura 7: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla II del año 2015.. ....   | 59 |
| Figura 8: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla I del año 2015..60   | 60 |
| Figura 9: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Chichimene del año 2015. ....   | 60 |
| Figura 10: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Acacías del año 2015. 61   | 61 |
| Figura 11: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla II del año 2016. ....   | 62 |
| Figura 12: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla I del año 2016. ....  | 62 |
| Figura 13: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Chichimene del año 2016.....   | 63 |
| Figura 14: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Acacías del año 2016. 63   | 63 |
| Figura 15: Variación temporal en la estación Acacías durante el periodo 2013 al 2016 para los parámetros PST y PM10. ....                         | 68 |
| Figura 16: Variación temporal en la estación Chichimene durante el periodo 2013 al 2016 para los parámetros PST y PM10.....                       | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 17: Variación temporal en la estación Castilla I para PST y PM <sub>10</sub> durante el periodo 2013 – 2016.....  | 78 |
| Figura 18: Variación temporal en la estación Castilla II para los contaminantes PST y PM <sub>10</sub> durante el periodo 2013-2016. ....  | 83 |
| Figura 19: Variación temporal en la estación Acacias durante el periodo 2013 al 2016 para los parámetros NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> . ....  | 86 |
| Figura 20: Variación temporal en la estación Chichimene para los contaminantes SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> durante los años 2013 al 2016.....  | 86 |
| Figura 21: Variación temporal en la estación Castilla I para los contaminantes SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> durante el periodo 2013-2016. ....  | 87 |
| Figura 22: Variación temporal en la estación Castilla II de los contaminantes SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> durante el periodo 2013-2016. ....   | 87 |
| Figura 23: Flujograma de la propuesta metodológica para el estudio de cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo ubicados en campos de producción petrolera.. .... | 89 |

## Lista de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Fuentes principales de emisión de contaminantes (PST, PM <sub>10</sub> , NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> ).....  | 29 |
| Tabla 2. Descripción de medidas estadísticas.....   | 31 |
| Tabla 3. Descripción y características de los contaminantes estudiados.....   | 33 |
| Tabla 4. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio establecidos en la Resolución 610 de 2010.....   | 36 |
| Tabla 5. Estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia para los contaminantes en estudio.....  | 37 |
| Tabla 6. Puntos de corte del ICA.....   | 38 |
| Tabla 7. Descripción de información preliminar a recopilar.....   | 42 |
| Tabla 8: Campañas de monitoreo calidad del aire 2013-2016.....  | 51 |
| Tabla 9: Proyección de la población del municipio de Castilla La Nueva para los años 2013 al 2016.....  | 53 |
| Tabla 10: Producción de petróleo estimada para el Campo Castilla durante el periodo 2013 al 2016.....   | 54 |
| Tabla 11. Proyección de la población de los municipios de Acacías y Guamal para los años 2013 al 2016.....  | 54 |
| Tabla 12. Producción de petróleo estimada para el Campo Chichimene durante el periodo 2013 al 2016.....   | 55 |
| Tabla 13. Resultados de las medidas estadísticas de la estación Acacías durante los años 2013-2016.....   | 64 |
| Tabla 14: Calculo del ICA para PM <sub>10</sub> en la estación Acacías.....   | 70 |
| Tabla 15. Resultados de las medidas estadísticas de la estación de Chichimene entre los años 2013 y 2016.....   | 71 |
| Tabla 16. Cálculo del ICA para PM <sub>10</sub> en la estación Chichimene.....  | 75 |
| Tabla 17. Resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM <sub>10</sub> para los tres puntos de monitoreo de la estación de Castilla I entre los años 2013 y 2016..... | 76 |
| Tabla 18. Cálculo del ICA para PM <sub>10</sub> en la estación Castilla I.....  | 80 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 19. Resultados de las medidas estadísticas de la estación de Castilla II entre los años 2013 y 2016..... | 81 |
| Tabla 20: Cálculo del para $PM_{10}$ en la estación Castilla II. ....  | 85 |
| Tabla 21. Descripción de información preliminar a recolectar.....  | 90 |
| Tabla 22. Estructura de la recopilación en tabla de datos.....   | 93 |
| Tabla 23. Medidas estadísticas para el análisis de datos. ....   | 94 |
| Tabla 24. Formato de consolidación de resultados estadísticos. ....  | 94 |
| Tabla 25. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios según la Resolución 2254 de 2017.....       | 97 |
| Tabla 26. Puntos de corte del ICA según Resolución 2254 de 2017.....   | 99 |

## Resumen

El objetivo principal del presente proyecto es proponer una metodología que permita, mediante el análisis estadístico y multitemporal, estudiar los cambios en la calidad del aire en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral. Para esta labor se identificó, validó y recopiló las variables de estudio en una base de datos, se realizó un análisis estadístico y multitemporal de la información mediante el software estadístico R y se llevó a cabo el cálculo del ICA, y a partir de las actividades efectuadas, se consolidó una metodología, que le permita a la empresa identificar las variables y los procedimientos necesarios para realizar el análisis multitemporal de la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo de campos petroleros.

Los resultados del proyecto destacan al año 2015 por reportar las mayores concentraciones de contaminantes PST y PM10 para todas las estaciones. En relación al cálculo del ICA, considerando únicamente las concentraciones máximas del contaminante PM10 para cada punto de monitoreo, se obtuvo que el 87,8% de los datos analizados tienen una clasificación de calidad del aire “Buena” y un 12,2% se clasificó como calidad del aire “Moderada”. La metodología propuesta se consideró acertada porque relaciona las variables que tienen incidencia en el comportamiento de la concentración y dispersión de los contaminantes atmosféricos y junto al análisis estadístico, multitemporal, y el cálculo del ICA se puede realizar el estudio de cambios en la calidad del aire en estaciones de crudo de campos de producción petrolera.

Palabras clave: Propuesta metodológica, concentración y comportamiento “multitemporal”, calidad del aire.

## **Introducción.**

El departamento del Meta se ha caracterizado por ser una zona de gran actividad petrolera, de acuerdo al Observatorio de Conflictos Ambientales, entre 2008 y 2016 el Meta se consolidó como el departamento de mayor producción de crudo del país (OCA, 2017). Estas actividades de producción petrolera afectan de forma directa a la calidad del aire, ya que en este proceso hay emisión de gases de combustión y ruido, venteos de gas natural por escapes en cabeza de pozo y emisión de material particulado a causa del funcionamiento de máquinas y a la circulación de vehículos (Cárdenas, 2013). Debido a las emisiones atmosféricas generadas por las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral, a la población que está expuesta a estas emisiones y los requerimientos establecidos por la entidad ambiental; Ecopetrol puso en marcha programas de vigilancia y seguimiento de la calidad atmosférica que incluyó la ejecución de los monitoreos de calidad del aire para evaluar el cumplimiento de los requerimientos establecidos por la normatividad ambiental colombiana, Resolución 610 de 2010, en relación con los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes criterio, y el seguimiento multitemporal de los mismos que permita evidenciar los cambios en la calidad del aire a través del tiempo.

Para dar cumplimiento a la medida propuesta por Ecopetrol, sobre el seguimiento multitemporal de los contaminantes atmosféricos, se realizó el estudio de cambios en la calidad del aire, mediante análisis multitemporal, en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral durante el periodo de estudio, y posteriormente, a partir de las actividades realizadas, se consolidó una metodología que relacionó las variables que tienen influencia en la calidad del aire (meteorológicas, producción de petróleo, topografía, población) y el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo, lo que permite evidenciar los cambios en la calidad del aire en otras estaciones de recolección y tratamiento de crudo.

El presente proyecto se dividió en tres fases:

En la primera fase, se validó la información secundaria para identificar las variables a analizar, en la que se seleccionaron los contaminantes criterio PST, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> a razón de que existen mediciones de concentración de estos, realizadas a través de los años en el área de estudio, se aclara que la empresa realiza mediciones a otros contaminantes, los cuales se determinó no tenerlos en cuenta porque la mayoría registra concentraciones por debajo de límite mínimo cuantificable, posteriormente se recolecta esta información y además otras variables que pueda influir en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos, como lo son las variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección del viento. Se incluyó información de producción de petróleo, topografía, población, ya que estas variables pueden incidir en la calidad atmosférica.

En la segunda fase, se inicia con el tratamiento de datos a partir del software estadístico R, utilizado por ser un software libre para el análisis de datos de calidad del aire, en la que se obtienen gráficas que representan la concentración de los contaminantes atmosféricos durante el periodo de estudio, seguidamente se realiza el análisis estadístico y multitemporal teniendo en cuenta los siguientes criterios: variación temporal de los contaminantes, evaluación del cumplimiento normativo, relación del comportamiento de los contaminantes con las variables meteorológicas, topográficas, población expuesta y frente a actividades propias que se desarrollan en el área de estudio e inciden en la calidad del aire, posterior a ello se realiza el cálculo del ICA, según los datos máximos de PM<sub>10</sub> por ser el contaminante que reporta las mayores concentraciones, para cada estación de recolección y tratamiento de crudo.

En la tercera fase se consolida una propuesta metodológica que permite analizar la calidad del aire a través de los años en otras estaciones de recolección y tratamiento de crudo ubicados en campos de producción. Es importante que se cuente con información completa de datos meteorológicos, de concentración de contaminantes, condiciones del terreno y población expuesta para el análisis de información.

## 1. Planteamiento del problema.

El Observatorio de Conflictos Ambientales señala que al interior del Bloque Cubarral, según información de autoridades ambientales y denuncias de comunidades, los impactos que más se destacan son la contaminación hídrica y atmosférica. En el Bloque Cubarral coexisten sectores productivos ligados a la agroindustria de la palma de aceite ,el arroz, la ganadería extensiva, la producción de peces y aves, el turismo, las empresas de tipo familiar, la economía campesina, y la industria petrolera que pueden tener afectación en la calidad del aire de la región (OCA, 2016). Dada la trascendencia del sector petrolero en la región, el presente estudio se enfoca específicamente a las fuentes de emisiones atmosféricas de dicha actividad.

La industria petrolera en el Bloque Cubarral, conformado por las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Chichimene, Acacías, Castilla I y Castilla II, opera desde el año 2000 por Ecopetrol S.A., y en el 2016 encabezaba la producción de crudo a nivel nacional; siendo, además, un referente central de las afectaciones ambientales ocasionadas por la actividad petrolera en el Llano (OCA, 2016).

De igual manera, Ecopetrol, en el proceso de actualización del PMA Bloque Cubarral 2016, soportado por la Resolución 0293 del 18 de marzo de 2016, identifica que las comunidades de los Municipios de Guamal, Acacías y Castilla La Nueva, ubicados en el área de influencia del proyecto, manifiestan su incomodidad frente a las emisiones atmosféricas que se generan, los cuales podrían aumentar con la autorización de actividades adicionales. Frente a esta inconformidad, Ecopetrol, en su Plan de Manejo Ambiental propuso ejecutar los monitoreos propuestos para evaluar el cumplimiento normativo que exige la Resolución 610 de 2010 y a partir de sus resultados hacer un seguimiento multitemporal del mismo para identificar a largo plazo los cambios que las emisiones generadas puedan producir sobre la calidad atmosférica (Ecopetrol S.A., 2015).

Para cumplir con esta medida de manejo, se determinó realizar un análisis multitemporal de los contaminantes atmosféricos en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del

Bloque Cubarral, de acuerdo a la información disponible y apartir de dichos resultados proponer una metodología que permita estudiar los cambios en la calidad del aire en otras estaciones de recolección y tratamiento ubicados en campos de producción petrolera.

Por lo tanto surge la siguiente pregunta, ¿Cómo desarrollar una propuesta metodológica que permita estudiar los cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo?

## **2. Objetivos.**

### **2.1 Objetivo General.**

- Proponer una metodología para estudiar los cambios en la calidad del aire, mediante análisis multitemporal, en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Castilla I, Castilla II y Chichimene de Ecopetrol S.A. durante el periodo 2013-2016

### **2.2 Objetivos Específicos.**

- Definir las variables de estudio, para generar una base de datos de acuerdo a la información recolectada en los monitoreos de calidad del aire de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, Acacías, Castilla I, Castilla II y Chichimene para el periodo 2013-2016
- Analizar el comportamiento de la calidad del aire mediante análisis estadístico y multitemporal para el periodo 2013 – 2016.
- Consolidar una propuesta metodológica que permita estudiar los cambios en la calidad del aire en zonas de influencia de campos de producción petrolera y realizar su validación a partir de la aplicación del caso de estudio.

### 3. Justificación.

El desarrollo del presente proyecto se sustenta teniendo en cuenta que la actual normatividad exige el cumplimiento de los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes criterio, sin embargo, su cumplimiento no da cuenta de los cambios de la calidad del aire a través del tiempo, ya que no provee un seguimiento continuo al comportamiento de las condiciones meteorológicas, a las condiciones de operación y generación de concentración de contaminantes atmosféricos, variables que están estrechamente relacionadas con la calidad del aire .

En la zona de estudio, Ecopetrol S.A, a través de laboratorios acreditados, realizó monitoreos de calidad del aire durante el periodo 2013 al 2016, con una frecuencia de un monitoreo por año, realizado durante 18 días continuos en el mes de diciembre, estos brindaron información de concentración de contaminantes criterio PST, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> para evaluar el cumplimiento normativo en cuanto a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010<sup>1</sup>, además, los monitoreos contienen información de actividades realizadas en las estaciones del Bloque Cubarral que pudieron tener influencia en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos, y a partir del año 2015, los informes técnicos proporcionaron información meteorológica de dirección, velocidad del viento y precipitación.

A partir de la información brindada, es posible realizar un análisis multitemporal, que permita evaluar el comportamiento que han tenido los contaminantes atmosféricos durante el periodo 2013 al 2016. Además, se plantea identificar por medio de técnicas estadísticas como medidas de tendencia central, de dispersión y de forma, las concentraciones promedio de los contaminantes atmosféricos, la variabilidad de los contaminantes y distribución de los mismos, además de identificar las concentraciones máximas y mínimas generadas durante el periodo de estudio, y a partir de las mismas calcular el índice de calidad del aire para determinar la clasificación de calidad atmosférica y los efectos para la salud vinculados a estos.

---

<sup>1</sup> Se resalta que la información se analizó con respecto a la Resolución 610 de 2010 debido a que en el periodo de estudio era la normatividad vigente, sin embargo se aclara que desde el 1 de enero de 2018 esta se encuentra derogada por la Resolución 2254 de 2017.

Teniendo en cuenta que no hay un seguimiento periódico a la calidad del aire de la zona, se requiere de una metodología para el estudio de cambios en la calidad atmosférica que pueda dar cuenta de las variables que se deben analizar para poder generar un reporte completo en atención a las quejas e inconformidades frente a las emisiones atmosféricas que se generan, presentadas por la comunidad de los municipios del área influencia directa del proyecto. Así mismo, la propuesta metodológica funciona como una herramienta que facilita evaluar el comportamiento temporal de la calidad atmosférica en estaciones de recolección y tratamiento de crudo de otros campos de producción petrolera.

La información obtenida a través de estos análisis estadísticos suministran una línea base para que la empresa identifique la variación de la calidad del aire en la zona de estudio, así mismo la metodología propuesta busca que se reconozca la importancia de hacer un seguimiento continuo de la calidad del aire a través de los años en estaciones de recolección y tratamiento de crudo ubicados en campos petroleros, teniendo en cuenta que la contaminación atmosférica es un problema global y de acuerdo a lo reportado por la Cumbre de París se requiere que cada país adopte planes y estrategias que contribuyan con la mejora de la calidad del aire (UNFCCC, 2017)

#### 4. Alcance.

El proyecto se limita al estudio de la calidad del aire asociado a emisiones atmosféricas provenientes del sector petrolero en el Bloque Cubarral el cual se divide en los campos Castilla y Chichimene que poseen infraestructura independiente, aunque interconectada mediante oleoductos y líneas de transferencia, posee un área de 23.423,46 ha y se localiza en jurisdicción de los municipios de Acacías, Castilla La Nueva y Guamal, en el departamento del Meta. Dentro del Área de Influencia Directa del proyecto, se encuentran ubicadas veinte (20) veredas del municipio de Acacías, diez (10) de Castilla La Nueva y tres (3) de Guamal. En la figura 1 se presenta la ubicación geográfica del Bloque Cubarral (Ecopetrol S.A. , 2015).

Las estaciones de medición de calidad del aire, fueron escogidos por los laboratorios acreditados, teniendo en cuenta las fuentes de emisiones que están relacionadas con las actividades industriales, agroindustriales, centros poblados y viviendas. En la infraestructura petrolera existente, las fuentes fijan que aportan a la emisión de contaminantes se encuentran en las estaciones: Acacías, Castilla I, Castilla II y Chichimene (Ecopetrol S.A. , 2012).

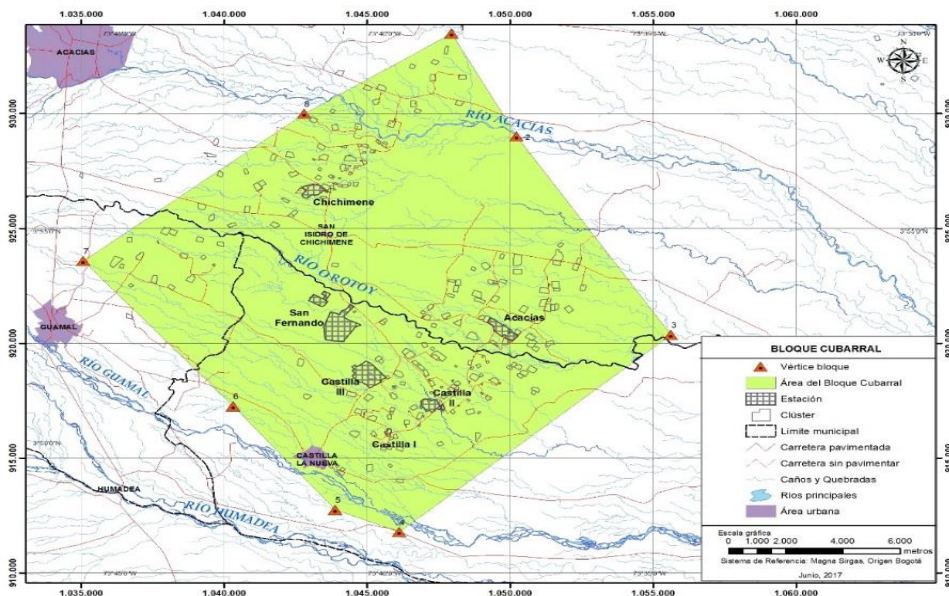


Figura 1: Localización estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral Campo Castilla – Chichimene. Adaptado de (Ecopetrol S.A., 2015)

Para el análisis de la calidad del aire en la zona de estudio se cuenta con información secundaria procedente de los monitoreos de calidad del aire, realizados por los laboratorios acreditados, contratados por Ecopetrol S.A., con una frecuencia de medición de 1 monitoreo por año, realizado durante 18 días en el mes de diciembre. El periodo de tiempo que cubre la investigación es del 2013 al 2016.

Dentro de los contaminantes que se miden anualmente, se encuentran los que tienen criterios basados en la afectación a la salud de la población, como fundamento para establecer niveles máximos permisibles en el aire, los cuales son: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono troposférico (O<sub>3</sub>), partículas suspendidas totales (PST) y material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10µm (PM<sub>10</sub>) (Tyler, Acevedo Bohorquez, Bocarejo Suescún, & Velásquez, 2013), además de estos, otros contaminantes de la industria petrolera como hidrocarburos totales (HT) y compuestos orgánicos volátiles (COV's).

Sin embargo, para la realización del análisis multitemporal, se descartan los contaminantes en las que su concentración se encuentra por debajo del límite mínimo cuantificable, dejando únicamente los contaminantes PST, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> para el análisis de la información. Estos contaminantes tienen incidencia en la afectación al sistema respiratorio de la población expuesta y además, tienen efectos significativos sobre la vegetación y sobre el medio (Jiménez Muñoz, 2011).

Además, las variables meteorológicas que se consideran en el alcance del estudio son precipitación y dirección y velocidad del viento, las cuales fueron obtenidas de los diferentes informes técnicos realizados por parte de la empresa. Es de resaltar que la información no está disponible como datos exactos y viene dada por la rosa de vientos y gráficas de precipitación para los años 2015 y 2016. Para los años 2013 y 2014 no se presentó información meteorológica por lo que no se pudo analizar el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos frente a las condiciones meteorológicas en estos años. Se aclara que para los años que no se encontró información de los monitoreos, se solicitó la misma al IDEAM, pero la entidad proporcionó información que no es compatible para el presente proyecto.

Además, se consideran otras variables que no brindaron los informes técnicos pero que influyen o están relacionadas con la calidad del aire de la región, dentro de estos se consideran la producción de petróleo durante el periodo de estudio, información obtenida de la ANH; la topografía o condiciones del terreno, obtenida del PMA del Bloque Cubarral; y la población, obtenida del DANE, y aunque el último censo realizado fue en el año 2005, se consideraron las proyecciones de los años 2013 al 2016.

## 5. Antecedentes.

El bloque de producción Cubarral es un referente principal en las afectaciones ambientales ocasionadas por la actividad petrolera en el llano. El principal impacto está dirigido a las fuentes hídricas, donde a través de los años, se han registrado diferentes derrames de petróleo que afectan ríos y caños. Sin embargo, son pocos los antecedentes públicos que se tienen de contaminación atmosférica en esta región por la actividad petrolera (OCA, 2017).

Según la Oficina de Participación Ciudadana de Ecopetrol S.A., base Orinoquía, se han registrado quejas relacionadas con la percepción que tienen los habitantes de los municipios de Acacías y Guamal sobre la afectación que les produce la calidad del aire ocasionada, según ellos, por las actividades del campo de producción del Bloque Cubarral. La información que brindaron, indica que los habitantes se quejan por malos olores y los más cercanos a las estaciones, por partículas que pueden afectar su salud. Sin embargo, no se tienen datos exactos del total de quejas reportadas en estos años sobre calidad atmosférica.

Las investigaciones que se mencionan a continuación, sirvieron de antecedentes para la realización del presente proyecto, estas se dividieron en tres temas principales (i) las investigaciones que se relacionan con el análisis multitemporal de la calidad del aire, (ii) las que relacionan como herramienta principal el software R para el análisis de la información y las que relaciona el análisis estadístico y (iii) los documentos que sirven de referencia para la formulación de la propuesta metodológica para el seguimiento de la calidad del aire.

En la investigación realizada por el (IDEAM, 2016) titulada: Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015, se reportan los niveles de las concentraciones de los contaminantes criterio en el periodo establecido. Como su nombre lo indica, el objetivo principal fue conocer el estado de la calidad del aire en zonas urbanas de Colombia para los años 2011-2015, para lo cual determinaron: los contaminantes cuyas concentraciones superan los niveles máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional, su distribución en el tiempo y las tendencias de los mismos, para lo anterior el estudio presentó un análisis de la evolución

temporal de las concentraciones anuales de los contaminantes atmosféricos, así como de los niveles de excedencias de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010. Lo anterior sirvió como referencia para realizar la evaluación del nivel de cumplimiento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos y la evaluación de las tendencias de estos a través de los años.

También, el Informe de Calidad del Aire para el Área Metropolitana de Costa Rica 2013-2015 (Briceño Castillo, Herrera Murillo, Solorzano Arias, Beita Guerrero, & Rojas Marin, 2016) tiene como propósito ofrecer a la población un análisis objetivo sobre las tendencias que guarda la calidad del aire en un contexto actual e histórico en lo que se refiere al material particulado. En la metodología utilizada en la investigación se realiza un análisis estacional y un análisis de la evolución temporal del material particulado entre los años 2013 al 2015. Al presente proyecto, se aportó el desarrollo del análisis de la evolución temporal de los contaminantes y no se tuvo en cuenta el análisis estacional debido a la información meteorológica incompleta que se tiene de los informes técnicos. Este informe da cuenta de la importancia de la continuidad de la información de la calidad del aire lo que sustenta las variables identificadas en la metodología propuesta.

En relación al análisis estadístico, el documento titulado Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos de (Posada Hernández, 2016), ofrece una guía para la comprensión de los elementos básicos estadísticos que permiten analizar un conjunto de datos, considerando a la estadística una herramienta principal para la toma de decisiones. Se utilizó en el presente estudio para la realización del análisis estadístico de la información, tomando como referencia el uso de las medidas de tendencia central, de distribución y de forma.

Para realizar el análisis multitemporal de la calidad del aire en el área en estudio, se utilizó el programa R Project for Statistical Computing, el cual es de uso libre y ofrece el paquete *openair* para procesar y analizar estadísticamente la información que se obtiene de la red de monitoreo de calidad del aire de una región (García Ávila, 2013), y en este caso en particular de las mediciones realizadas en el Bloque cubarral. A continuación, se mencionan las investigaciones relacionadas con el análisis de la calidad del aire mediante el software R.

En un estudio realizado por Tamsin Mitchel en el año 2011, y titulado Annual air quality monitoring report for the Wellington region (Mitchel, 2011), se estudió el comportamiento de CO, NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> a partir de la herramienta Openair, y se mostró el incremento en la concentración de PM<sub>10</sub> por el uso de quemadores domésticos en el invierno del 2011.

En relación con la propuesta metodológica, la investigación titulada Propuesta metodológica para correlacionar la calidad del aire y las enfermedades respiratorias en un municipio intermedio colombiano: Caso de Tuluá – Valle del Cauca de (Arias & Daza, 2009), tiene como objetivo proponer una metodología para correlacionar la calidad del aire y las enfermedades respiratorias en un municipio intermedio colombiano. La investigación sirvió como referencia para determinar las variables que pueden tener influencia en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos y para formular los procedimientos y actividades que consolidan la propuesta metodológica para el estudio de cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo ubicados en campos de producción petrolera.

## **6. Marco de referencia.**

### **6.1 Marco Teórico.**

El origen de la contaminación del aire se debe a diferentes fuentes de emisión, entre las que se destacan, los transportes, la producción de energía eléctrica, la incineración de residuos, el consumo de combustible industrial, doméstico y los procesos industriales, en este caso especialmente de la industria petrolera (Seinfeld, 2013). Además, el estado de la calidad del aire está relacionada con factores como el tipo de relieve (factor físico), las reacción químicas de los contaminantes en la atmósfera y su dispersión (factores químicos y meteorológicos), los usos y costumbres de la población (factores sociales), las actividades económicas y el uso y aprovechamiento de la tecnología (factores económicos y tecnológicos) (Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable México, 2011).

El Bloque Cubarral, operado desde el año 2000 por Ecopetrol S.A, conformado por las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Castilla I, Castilla II y Chichimene, al año 2016 encabezaba la producción de crudo a nivel nacional (OCA, 2016). Las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral tienen como funciones importantes:

1. Recolectar la producción de los diferentes pozos ubicados en los campos Castilla y Chichimene.
2. Separar la fase líquida y gaseosa de fluido multifásico proveniente de los pozos productores.
3. Medir la producción de petróleo, agua y gas de cada pozo productor.
4. Proporcionar un sitio de almacenamiento provisional al petróleo.
5. Bombear el petróleo al patio de tanques o terminal de almacenaje (Barrientos, 2015)

Las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, en sus procesos o actividades, sirven como fuentes principales de emisión de contaminantes como material particulado, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, tal como lo relaciona la tabla 1:

Tabla 1. *Fuentes principales de emisión de contaminantes (PST, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>)*

| CONTAMINANTE                                   | FUENTES PRINCIPALES  |
|--|--|
| <b>Material particulado</b>                    | Procesos de combustión, cuando se utiliza crudo o ACPM en motores, o por quemas ocasionales de aceite. |
|  | Áreas destapadas, tales como vías de acceso, y zonas desprovistas de vegetación                        |
|  | Transporte de materiales de construcción.  |
|  | Teas, cuando la corriente gaseosa arrastra líquido en cantidades significativas.                       |
|  | Incineradores de residuos sólidos.   |
| <b>Gases (NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>)</b> | Fuentes fijas (Chimeneas de hornos, calderas, incineradores, separadores, térmicos, etc)               |
|  | Teas   |
|  | Incineradores de residuos  |
|  | Fuentes móviles utilizadas en las estaciones.  |

*Nota:* Descripción de las fuentes principales de los contaminantes PST, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> pertenecientes a la industria petrolera. Adaptado de (Cárdenas, 2013)

La contaminación del aire puede en muchos casos observarse con facilidad, sin embargo, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad a través de la medición y seguimiento de la concentración en que se presentan los contaminantes en el aire, tanto espacial como temporalmente. Esta medición sirve especialmente para determinar el estado de la calidad del aire en ese periodo de tiempo y comparar las mediciones con las normas nacionales para determinar el cumplimiento de los estándares permitidos (Morales & Nobles, 2013)

Debido a la creciente preocupación por la contaminación atmosférica y de cómo manejar los datos históricos reportados por las diferentes estaciones de monitoreo de calidad del aire, surgen herramientas estadísticas y matemáticas que facilitan su correcta interpretación, con el fin de poder determinar la concentración y distribución de los contaminantes atmosféricos, además de evaluar el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional. Las herramientas de análisis de datos se presentan como una alternativa para comprender a fondo la problemática de la contaminación en la atmósfera, los posibles factores de control y la aplicación en modelos de dispersión de los contaminantes (Cortés Araújo, 2013). Algunos ejemplos de software para el análisis de datos son R, Excel, MATLAB entre otros.

En este estudio se utilizó el software de programación R, de uso libre para el análisis estadístico y gráfico de datos. Este software tiene implementada una librería llamada Openair (también es de uso libre), la cual permite el análisis de datos de calidad del aire. (Carslaw, 2015).

Para analizar la variación que presentan uno o más parámetros con respecto a distintos periodos temporales, estableciendo así patrones de evolución en el comportamiento de dichos parámetros en la zona de estudio, es necesario una herramienta de enorme utilidad para el análisis de la calidad del aire, para lo cual el software R tiene la función Gráfica básica de representación de datos en dos ejes - plot y que en su ejecución presenta gráficas con la evolución temporal de los contaminantes en estudio (Follos Pliego, 2012).

La función que se utilizó para el análisis normativo es RollingMean que aplicada a un conjunto de datos determinado no modifica ningún campo, sino que genera una variable nueva en el conjunto de datos a la que se le asigna la media móvil calculada para el parámetro designado, que representa el valor límite permisible en la normatividad nacional. (Follos Pliego, 2012)

Además, se aplica estadística descriptiva a los datos con el fin de comprender su estructura, de manera de detectar tanto un patrón de comportamiento general como apartamientos del mismo

(Posada Hernández, 2016). En la tabla 2 se describe las medidas estadística utilizadas en el estudio.

Tabla 2. Descripción de medidas estadísticas.

| Medida estadística               | Fórmula  | Descripción  |
|----------------------------------|--|--|
| <b>Mínimo</b>                    | Min (Ls)   | Menor valor de la variable   |
| <b>Máximo</b>                    | Max (Li)   | Mayor valor de la variable   |
| <b>Rango</b>                     | R= [Ls - Li ]<br>R: rango o recorrido.<br>Li: límite inferior (menor valor de la variable).<br>Ls: límite superior (mayor valor de la variable)  | Se define como la variación numérica de la variable, es el recorrido que toma la variable desde el valor más pequeño hasta el valor más alto.          |
| <b>Media</b>                     | $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$<br>$\bar{X}$ : media aritmética de la muestra<br>n: total de datos de la muestra<br>$x_i$ : dato de la variable<br>$\sum_{i=1}^n x_i$ : suma de todos los valores de la muestra | Representa el promedio del conjunto de datos de la muestra   |
| <b>Mediana</b>                   | Si es impar:<br>$i = \frac{X_{n+1}}{2}$<br>Si es par:<br>$i = \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1}}{2}$<br>X: Base de datos<br>n: Total de datos de la muestra  | Es el valor que ocupa el lugar central, de tal forma que aquel valor deja el 50% de las observaciones por debajo de él y el otro 50% por encima de él. |
| <b>Desviación estándar</b>       | $s = \sqrt{s^2}$<br>s: Desviación estándar<br>s <sup>2</sup> : Varianza  | La desviación estándar es considerada la medida de dispersión con mayor representatividad para un conjunto de datos.                                   |
| <b>Coefficiente de variación</b> | $CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$<br>S: Desviación estándar<br>$\bar{X}$ : media aritmética de la muestra   | Relaciona la desviación estándar con la media aritmética para determinar qué tan homogénea o dispersa es la información                                |

Tabla 2. Continuación

|                  |   |   |
|------------------|---|---|
| <b>Curtosis</b>  | $g_2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^4}{n * s^4} - 3$ <p> <math>\bar{X}</math> : media aritmética de la muestra<br/> n= Total de datos de la muestra<br/> x<sub>i</sub>: cada dato de la variable<br/> s: Desviación estándar </p> | <b>La curtosis es una medida que permite analizar la concentración de los datos alrededor de los valores medios de la muestra.</b>  |
| <b>Asimetría</b> | $g_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n * s^3}$ <p> <math>\bar{X}</math> : media aritmética de la muestra<br/> n= Total de datos de la muestra<br/> x<sub>i</sub>: cada dato de la variable<br/> s: Desviación estándar </p>     | La asimetría permite mostrar la inclinación de los datos hacia los extremos.<br>Sesgo > 0: sesgo positivo o a la derecha.<br>Sesgo = 0: simetría en la distribución de los datos. Sesgo < 0: sesgo negativo o a la izquierda. |

*Nota:* Descripción y fórmula de las principales medidas estadísticas que se utilizaron en el presente proyecto. Adaptado de “Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos” (Posada Hernández, 2016)

A partir del análisis multitemporal de la calidad del aire en el Bloque Cubarral, se diseñó una metodología para evaluar los cambios en la calidad del aire, entre diferentes periodos de tiempo, en el área de campos petroleros. La metodología es parte del proceso de investigación, en la cual deberá indicarse el proceso a seguir en la recolección de la información, así como en la organización, sistematización y análisis de datos. El diseño metodológico es la base para planificar todas las actividades que demanda el proyecto para determinar los recursos humanos y financieros requeridos (Marciniak, 2017).

## 6.2 Marco Conceptual

La calidad del aire hace referencia a la palabra inmisión, definida en la resolución 610 de 2010 del MAVDT como la transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor”. Aire inmiscible es el aire respirable a nivel de la troposfera y que debe estar “constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica” de acuerdo a la misma resolución (Resolución 610 de 2010, 2010).

La adición de cualquier sustancia en el aire puede alterar en cierto grado las propiedades físicas y químicas del aire natural, de manera que estos compuestos pueden considerarse como sus contaminantes. No obstante, se clasifican como contaminantes únicamente aquellas sustancias derivadas de la actividad económica que, añadidas en suficiente cantidad y duración causen efectos mensurables en los seres humanos, los animales, la vegetación o los materiales, y que generen perjuicios en la salud y el bienestar humano, e interfieran en el goce de la vida o la propiedad. (Ideam, 2015)

Los contaminantes que son objeto de análisis son descritos en la Tabla 3 incluyendo su descripción, origen y posibles efectos en la salud y el ambiente.

Tabla 3. *Descripción y características de los contaminantes estudiados.*

| <b>Contaminante</b>   | <b>Origen</b>  | <b>Efectos en la salud</b>   | <b>Efectos en el ambiente</b>   |
|---|--|--|---|
| <b>Material Particulado (PST – PM10)</b>  |  |  |   |
| A este grupo de contaminantes pertenecen una variada gama de neblinas, humos, emanaciones y polvos distribuidos en el aire. | Plantas de generación energía, domésticas, sujetas a erosión y motores diésel, centrales térmicas, vehículos de motor. | de La intensidad de los efectos de las partículas sobre la salud del hombre depende del grado de penetración en las vías respiratorias y de la toxicidad de las sustancias involucradas. | Un posible efecto indirecto de las partículas depositadas sobre las plantas es que pueden contener compuestos químicos nocivos para los animales que las comen. |

Tabla 3. Continuación

| <b>Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| Gases incoloros que se forman al quemar azufre. El dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) es el contaminante criterio que indica a concentración de óxidos de azufre en el aire.  | Centrales térmicas, refinерías y fundiciones.  | Los óxidos de azufre perjudican el sistema respiratorio. Los efectos de los óxidos de azufre empeoran cuando el dióxido de azufre se combina con partículas o humedad del aire.   | Los óxidos de azufre contribuyen a la formación de lluvia ácida La influencia sobre la vegetación se manifiesta desde daños a las hojas hasta la muerte de las plantas.   |
| <b>Dióxido de Nitrogeno (NO<sub>2</sub>)</b>  |  |   |   |
| Se conocen ocho óxidos de nitrógeno distintos pero normalmente se detectan tres de ellos en la atmósfera, el óxido de nitroso (N <sub>2</sub> O), el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ). | Según la EPA, el 95,6% del NO <sub>x</sub> liberado proviene del transporte y la combustión estacionaria; mientras que la eliminación de residuos sólidos, los desperdicios industriales y las cremaciones e incendios forestales son menos del 5% del aporte de NO <sub>x</sub> a la atmósfera. | Los efectos sobre la salud humana y animal están relacionados con enfermedades de las vías respiratorias, con una secuencia de efectos tales como irritación nasal, incomodidades respiratorias, dolores respiratorios fuertes, edema pulmonar e incluso la muerte. | La presencia de NO <sub>x</sub> en la atmósfera causa lesiones y daños en las plantas como se ha podido demostrar en estudios efectuados en zonas aledañas a fuentes industriales específicas de NO <sub>x</sub> (por ejemplo industrias productoras de ácido nítrico) o de experimentaciones realizadas en el laboratorio. |

*Nota:* Descripción, origen y efectos en la salud y en el ambiente de los contaminantes PST y PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Adaptado de “ (Tyler, Acevedo Bohorquez, Bocarejo Suescún, & Velásquez, 2013)

Además de los contaminantes atmosféricos, cabe resaltar que las variables meteorológicas presentan una fuerte influencia en el transporte y dispersión de los contaminantes, y que en

asociación con estas, pueden lograr efectos adversos en la calidad del aire y en la salud de la población. (Cortés Araújo, 2013)

Según la Organización Panamericana de la Salud, “La meteorología se usa para predecir el impacto ambiental de una nueva fuente de contaminación del aire y para determinar el efecto de las modificaciones de las fuentes existentes en la calidad del aire”; es por esto que se hace necesario analizar y correlacionar las principales variables meteorológicas con concentraciones de contaminantes atmosféricas (Cortés Araújo, 2013). Las variables meteorológicas que se relacionan con el comportamiento de los contaminantes atmosféricos en el presente estudio, al ser la única información contenida en los monitoreos de calidad del aire son:

**Dirección y velocidad del viento:** La velocidad del viento actúa como un factor de transporte y control de la dispersión de contaminantes atmosféricos. La dirección del viento establece la orientación en la cual se transportan y difunden los contaminantes en el aire. Estas variables son de importancia en el análisis de posibles fuentes de contaminación atmosférica en una determinada zona, y también pueden ser útiles en la determinación de las condiciones de estabilidad atmosférica y el grado en el cual se podrían estar dispersando contaminantes atmosféricos. (Cortés Araújo, 2013)

**Precipitación:** Esta variable puede promover la disminución de la concentración de contaminantes en el aire, por acción de procesos de lavado atmosférico. (Cortés Araújo, 2013)

### **6.3 Marco Legal.**

El artículo 39 del Decreto 2041 de 2014 establece las reglas generales para las licencias ambientales que igualmente son aplicables para planes de manejo (Decreto 2041 del 2014, 2014). A través de esta normativa, Ecopetrol S.A. solicitó la modificación del Plan de Manejo Ambiental del proyecto Bloque Cubarral, Campos Castilla y Chichimene. Para este proyecto, la ANLA establece las obligaciones presentadas para la actualización del Plan de Manejo Ambiental; que en lo relacionado a la calidad del aire dicta:

“La empresa deberá realizar monitoreos de calidad del aire dos veces al año, de acuerdo con el periodo de lluvias, en verano y en invierno, y la actividad de perforación, ubicando equipos de monitoreo en por lo menos tres puntos de acuerdo con el modelo de dispersión y la dirección predominante de los vientos, fuentes de emisión, ubicación de receptores sensibles tales como viviendas o área pobladas, entre otros. Además, en los Planes de Manejo Ambiental – PMA Específicos presentar los modelos de calidad del aire y ruido de acuerdo con lo establecido en las Resoluciones 601 de 2006 y 610 de 2010 y el protocolo de monitoreo de calidad del aire. Con base en ellos se deberá justificar que la ubicación de las actividades autorizadas no generan afectaciones por aire y ruido a los habitantes de las viviendas cercanas.” (Resolución 0293 de 2016, 2016).

Para la realización del análisis de cambios en la calidad del aire en las estaciones del Bloque Cubarral de Ecopetrol durante el periodo 2013 al 2016, se verifica el comportamiento del cumplimiento normativo de acuerdo a lo establecido por la Resolución 610 de 2010, que en lo referente a los contaminantes criterio PST, PM<sub>10</sub>, y NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> establece:

Tabla 4. *Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio establecidos en la Resolución 610 de 2010*

| <b>Contaminante</b>    | <b>Nivel Máximo Permisible (µg/m<sub>3</sub>)</b> | <b>Tiempo de Exposición</b> |
|------------------------|---|-----------------------------|
| <b>PST</b>             | 100   | Anual                       |
|                        | 300   | 24 horas                    |
| <b>PM<sub>10</sub></b> | 50  | Anual                       |
|                        | 100   | 24 horas                    |
| <b>SO<sub>2</sub></b>  | 80  | Anual                       |
|                        | 250   | 24 horas                    |
|                        | 750   | 3 horas                     |
| <b>NO<sub>2</sub></b>  | 100   | Anual                       |
|                        | 150   | 24 horas                    |
|                        | 200   | 1 hora                      |

*Nota:* Concentración máxima a niveles de referencia de los contaminantes en estudio según la normatividad ambiental, Resolución 610 de 2010. Adaptado de (Resolución 610 de 2010, 2010)

El artículo 10 de la Resolución 610 de 2010 establece la concentración a condiciones de referencia y el tiempo de exposición por lo cual las autoridades ambientales deben declarar los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia para los contaminantes en estudio, relacionados en la tabla 5:

Tabla 5. *Estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia para los contaminantes en estudio.*

| Contaminante           | Tiempo de Exposición | Estados Excepcionales                      |  |  |
|------------------------|----------------------|--|--|--|
|                        |                      | Prevención<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Alerta<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Emergencia<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
| <b>PST</b>             | 24 horas             | 375  | 625                                    | 875  |
| <b>PM<sub>10</sub></b> | 24 horas             | 300  | 400                                    | 500  |
| <b>SO<sub>2</sub></b>  | 24 horas             | 500  | 1000                                   | 1600                                       |
| <b>NO<sub>2</sub></b>  | 1 hora               | 400  | 800                                    | 2000                                       |

*Nota:* Estados excepcionales de prevención, alerta y emergencia para los contaminantes PST, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Adaptado de (Resolución 610 de 2010, 2010)

**Nota aclaratoria:** La Resolución 610 de 2010 se encuentra derogada por la Resolución 2254 de 2017 desde el 01 de enero de 2018. Sin embargo, el periodo de estudio se encuentra dentro de la vigencia de la Resolución 610 de 2010, por lo que se tiene en cuenta esta normativa para la evaluación del cumplimiento de los límites máximos permisibles.

Además, para determinar el nivel de contaminación atmosférica, El “Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., 2010) establece un indicador que funciona como una herramienta para comparar los niveles de contaminación en diferentes estaciones de monitoreo e informar a la población, sobre la calidad atmosférica en la zona donde habita. Este indicador permite hacer una relación directa entre los niveles de concentración del contaminante y los efectos en la salud, como se relaciona en la tabla 6.

Tabla 6. *Puntos de corte del ICA*

| ICA       | COLOR    | CLASIFICACIÓN                                 | O <sub>3</sub> 8h<br>ppm | O <sub>3</sub> 1h<br>ppm | PM <sub>10</sub><br>24h<br>µg/m <sup>3</sup> | PM <sub>2.5</sub><br>24h<br>µg/m <sup>3</sup> | CO 8h<br>ppm | SO <sub>2</sub> 24h<br>ppm | NO <sub>2</sub> 1h<br>ppm |
|-----------|----------|---|--------------------------|--------------------------|--|---|--------------|----------------------------|---------------------------|
| 0 - 50    | Verde    | Buena   | 0.000                    | -                        | 0  | 0   | 0            | 0                          | 0                         |
|           |          |   | 0.059                    |                          | 54   | 12  | 4.4          | 0.035                      | 0.053                     |
| 51 - 100  | Amarillo | Moderada                                      | 0.060                    | -                        | 55   | 12.1  | 4.5          | 0.036                      | 0.054                     |
|           |          |   | 0.075                    |                          | 154  | 35.4  | 9.4          | 0.075                      | 0.100                     |
| 101 - 150 | Naranja  | Dañina a la salud<br>para grupos<br>sensibles | 0.076                    | 0.125                    | 155  | 35.5  | 9.5          | 0.076                      | 0.101                     |
|           |          |   | 0.095                    | 0.164                    | 254  | 55.4  | 12.4         | 0.185                      | 0.360                     |
| 151 - 200 | Rojo     | Dañina a la salud                             | 0.096                    | 0.165                    | 255  | 55.5  | 12.5         | 0.186                      | 0.361                     |
|           |          |   | 0.115                    | 0.204                    | 354  | 150.4   | 15.4         | 0.304                      | 0.649                     |
| 201 - 300 | Púrpura  | Muy Dañina a la<br>salud                      | 0.116                    | 0.205                    | 355  | 150.5   | 15.5         | 0.305                      | 0.650                     |
|           |          |   | 0.374                    | 0.404                    | 424  | 250.4   | 30.4         | 0.604                      | 1.249                     |
| 301 - 400 | Marrón   | Peligrosa                                     | -                        | 0.405                    | 425  | 250.5   | 30.5         | 0.605                      | 1.250                     |
|           |          |   | -                        | 0.504                    | 504  | 350.4   | 40.4         | 0.804                      | 1.649                     |
| 401 - 500 | Marrón   | Peligrosa                                     | -                        | 0.505                    | 505  | 350.5   | 40.5         | 0.805                      | 1.650                     |
|           |          |   | -                        | 0.604                    | 604  | 500.4   | 50.4         | 1.004                      | 2.049                     |

*Nota:* Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire teniendo en cuenta su concentración y tiempos de exposición de los contaminantes O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Adaptado de (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., 2010)

**Nota aclaratoria:** Los puntos de corte del ICA de la Tabla 6 corresponden a lo reportado en el “Manual de Operaciones de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire” en el año 2010 y aunque la Resolución 2254 de 2017 actualiza los puntos de corte del ICA, como se menciona anteriormente el periodo de estudio se encuentra dentro de la vigencia de lo estipulado en el Manual.

## 7. Metodología

El presente proyecto se llevó a cabo en 3 fases. La primera fase consistió en identificar, validar y recopilar en una base de datos la concentración de los contaminantes atmosféricos, provenientes de los estudios técnicos de calidad del aire realizados por Antek, laboratorio acreditado y contratado por la entidad para dar cumplimiento a lo estipulado en el PMA, en los años 2013 al 2016. Además, se incluyó información del área de estudio que pudo tener influencia en la calidad del aire (producción de petróleo, condiciones topográficas y características meteorológicas), además se consideró la población por ser los principales expuestos por la contaminación atmosférica en el área de estudio. En la segunda fase, se realizó un análisis estadístico y multitemporal de la información de la calidad del aire para el periodo 2013-2016 con la utilización del software libre R, posteriormente se calculó el Índice de Calidad del Aire (ICA). En la tercera fase se elaboró la propuesta metodológica para estudiar los cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo

En la figura 2 se presenta el diagrama metodológico del presente proyecto.

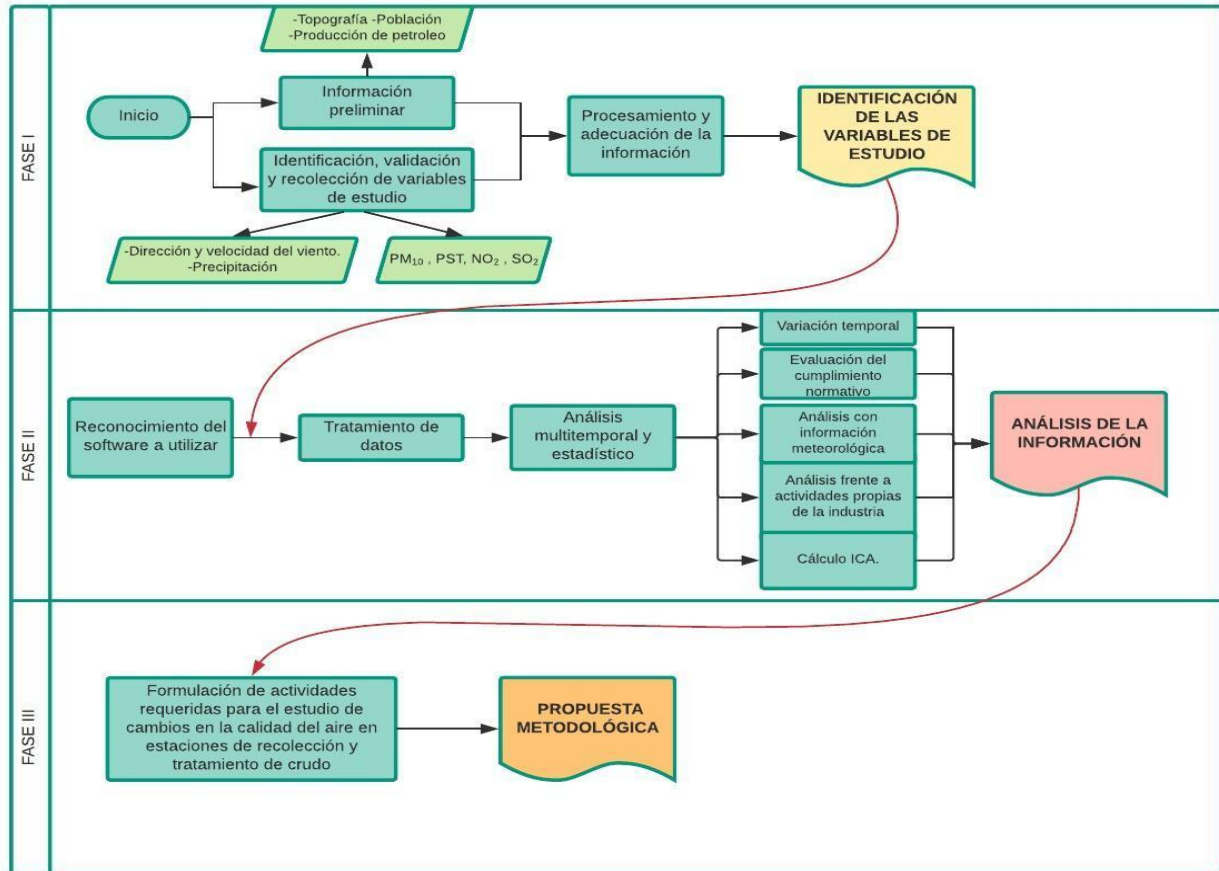


Figura 2: Diagrama metodológico. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

## 7.1 FASE I: Identificación, validación y recopilación de variables de estudio.

### 7.1.1 Validación de los datos.

La validación de la información se realiza a los resultados de las mediciones de concentración de los contaminantes atmosféricos realizados por laboratorios acreditados por el IDEAM, contratados por Ecopetrol, para el desarrollo de los monitoreos anuales de calidad del aire realizados durante el periodo 2013 al 2016. Para su verificación se tomó en consideración las especificaciones y reglas para la validación de datos estadísticos obtenidas del “Documento metodológico de estadísticas de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire – EMSCA (GPVD)” (Ideam, 2017), y que sugieren los siguientes criterios:

1. Prueba del total de datos,
2. Datos atípicos
3. Relaciones entre parámetros y valores negativos.

### **7.1.2 Definir compuesto para analizar.**

Posterior a la validación de los datos, se definen los contaminantes atmosféricos a analizar, para lo cual se cuenta con información correspondiente a 1 monitoreo de calidad del aire anual por estación de recolección y tratamiento de crudo, para un total de 4 monitoreos de calidad del aire anuales y 16 durante el periodo de estudio. Los mismos se realizaron en un periodo de 18 días continuos, para un total de 18 muestras por parámetro en cada punto por estación, el análisis se encuentra fundamentado en los lineamientos establecidos en las Resoluciones 610 y 2154 de 2010 emitidas por el MAVDT hoy MADS y avalados por la Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (EPA). Estos contemplan la medición de los contaminantes PST, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> y COV's; sin embargo, los contaminantes CO, O<sub>3</sub> y COV's reportan en todos sus resultados, concentraciones por debajo de los límites mínimos cuantificables, por lo que no se consideran en el análisis de la información. Por lo siguiente, se determina realizar el análisis a los contaminantes PST, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> mediante la construcción de gráficos que permitieron evidenciar la variación temporal de la concentración de los compuestos evaluados. Se aclara que la totalidad de los monitoreos de calidad del aire fueron realizados en diferentes días del mes de diciembre, es decir, según lo reportado en el IDEAM en el “Atlas Climatológico de Colombia”, este mes se caracteriza por sus bajas precipitaciones.

### **7.1.3 Definir variables meteorológicas**

Se tuvo en cuenta las variables meteorológicas de precipitación y velocidad y dirección del viento que presentan influencia en la orientación, transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos. En este caso, se analizaron las rosas de vientos y las gráficas que representan las precipitaciones presentados en los informes técnicos de calidad del aire para los años 2015 y 2016. Se aclara que para los años 2013 y 2014 no se presentó información meteorológica porque los monitoreos de calidad del aire para estos años no brindaron la información correspondiente a

las variables meteorológicas. Además, esta información fue solicitada al IDEAM, pero la entidad no brindó información correspondiente a estos años.

#### 7.1.4 Información complementaria para el estudio.

Con el fin de relacionar características del área de estudio que puedan influir en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos en el aire, se recopiló las siguientes variables. La Tabla 7 contiene la información preliminar a recopilar y su descripción.

Tabla 7. Descripción de información preliminar a recopilar.

| <b>INFORMACIÓN<br/>PRELIMINAR</b>           | <b>DESCRIPCIÓN</b>   |
|---|--|
| <b>Población</b>                            | Debido a que es la población, la que se ve más expuesta a la contaminación del aire, es de gran importancia identificarla y ubicarla según su distribución en el área de estudio. En este caso se considera la población del área de influencia directa del proyecto, es decir, municipios de Acacías, Guamal y Castilla La Nueva, y su ubicación en los campos de producción petrolera. |
| <b>Producción petróleo</b>                  | Se incluye la producción de petróleo a través de los años 2013 al 2016 en los campos Castilla y Chichimene, teniendo en cuenta que a mayor producción implica mayores actividades de construcción, quema de gas, incineración de desechos y mayor potencial de fugas que pueden afectar la calidad del aire.   |
| <b>Topografía y condiciones del terreno</b> | Estas variables tienen incidencia en el transporte y dispersión de los contaminantes.  |

*Nota:* Descripción de la información preliminar a recopilar para el desarrollo del estudio. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

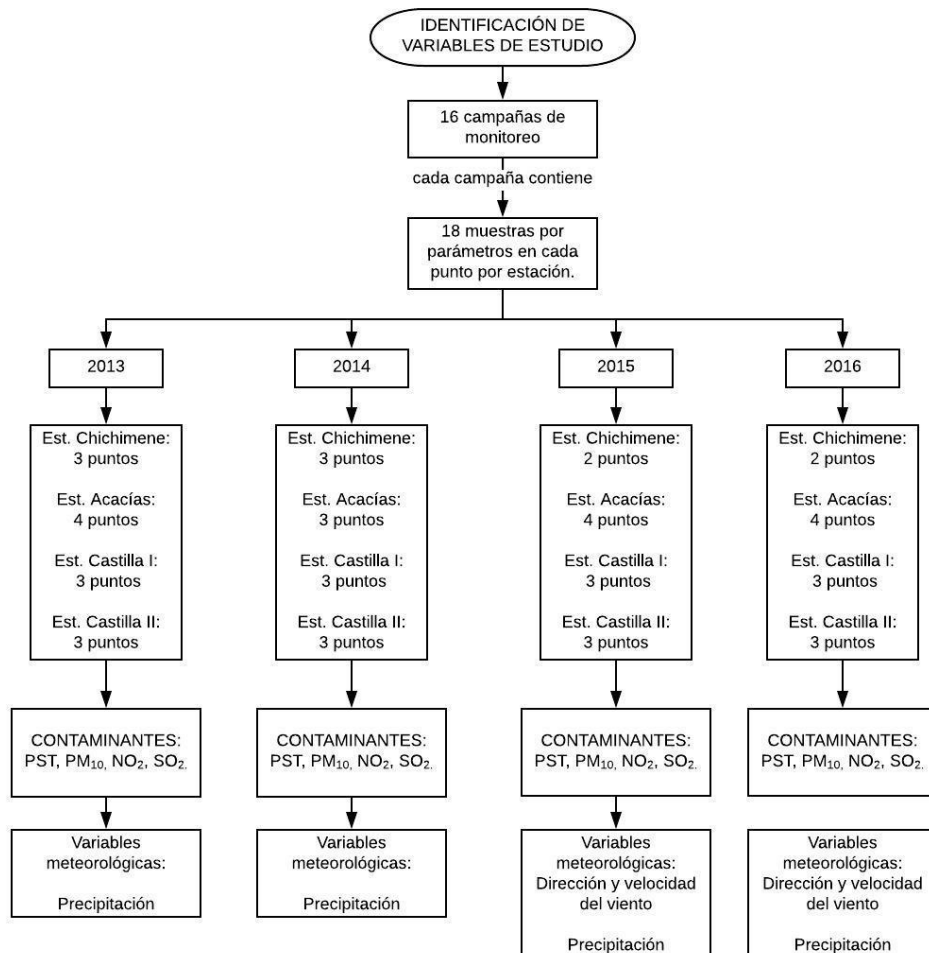


Figura 3: Identificación de variables de estudio. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

## 7.2 FASE II: Análisis estadístico y multitemporal de la información.

El análisis fue dividido en 2 corrientes principales:

1. Análisis estadístico: Corresponde a la aplicación de medidas estadísticas a la base de datos de concentración de contaminantes PST y PM<sub>10</sub> durante el periodo de estudio y su posterior interpretación.
  - Medidas de tendencia central:
  - Medidas de dispersión
  - Medidas de forma

## 2. Análisis multitemporal:

- La variación de la concentración de las partículas PST, PM<sub>10</sub>, y los gases SO<sub>2</sub> NO<sub>2</sub> con respecto a los años 2013 al 2016, para lo que se utiliza el software estadístico R.
- Relación de las variables meteorológicas, topográficas y de producción de crudo de las estaciones de tratamiento y recolección de crudo durante el periodo de estudio que puedan tener influencia en el comportamiento de los contaminantes
- Evaluación del cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Cálculo del ICA.

### 7.2.1 Análisis estadístico.

Para profundizar el análisis, se aplicaron medidas estadísticas que permiten estudiar los datos por medio de cálculos matemáticos que expliquen el comportamiento de los contaminantes atmosféricos. Se aplicó el análisis estadístico a los contaminantes que presentaron mayor variabilidad en su comportamiento, por lo que inicialmente, se observó en las figuras que representan la concentración de los contaminantes, y se verificó que los contaminantes NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> durante el periodo de estudio presentan concentraciones muy bajas, es decir, estas se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles y las concentraciones, en general, tienen casi todas la misma medida, por lo cual, se aplica el análisis estadístico únicamente a los contaminantes PST y PM<sub>10</sub>. Se utilizaron medidas de tendencia central, medidas de dispersión y medidas de forma, como se relaciona en la Figura 4.

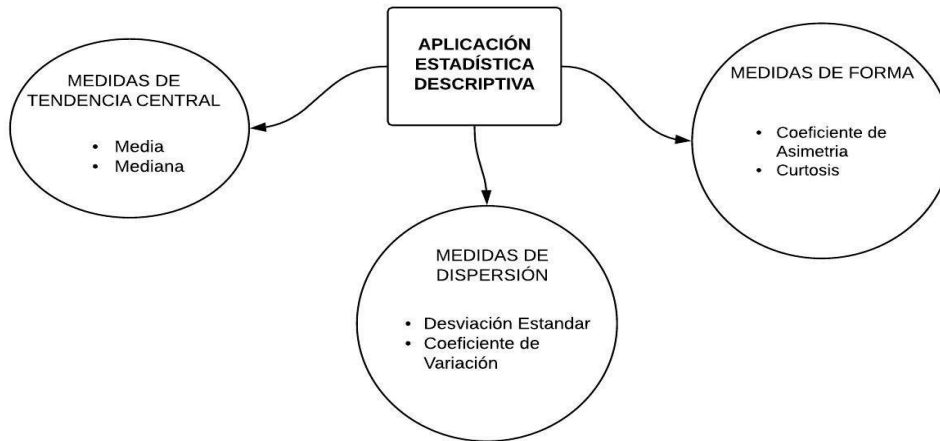


Figura 4: Aplicación de estadística descriptiva. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

A partir de la base de datos de concentración de los contaminantes PST y  $PM_{10}$  de cada punto de monitoreo de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral para cada año, se realizó la aplicación de las medidas estadísticas de tendencia central, dispersión y de forma, donde se utilizó el programa Microsoft Excel y su función “Análisis de datos” que permite realizar todos los cálculos correspondientes a la estadística descriptiva aplicado a los 18 datos de concentración de contaminantes PST y  $PM_{10}$  anuales de cada punto de monitoreo durante el periodo 2013 - 2016. Una vez obtenidos los resultados de la aplicación de la estadística descriptiva, se procede a interpretarlos considerando las medidas de tendencia central como los valores promedio o centrales que son representativos de todo el conjunto de datos, las medidas de dispersión que representan la variabilidad o la dispersión que los datos pueden tener en relación a una medida central y las medidas de forma para identificar la distribución de los datos.

## 7.2.2 Análisis multitemporal.

### 7.2.2.1 Software R.

Antes de iniciar el análisis de la información, se escoge el software a utilizar, en este caso se selecciona al software R por ser un entorno libre pensado para el análisis estadístico y gráfico de datos, utilizado en el tratamiento de datos de la calidad del aire. R como entorno de

programación básicamente se trata de una consola (ventana de trabajo) sobre la que se van introduciendo scripts (instrucciones más o menos complejas) que se ejecutan sobre los datos previamente cargados (conjuntos o ventanas de datos), en este software se utiliza la función “Gráfica básica de representación de datos en dos ejes – plot” que utilizada directamente sobre el conjunto de datos, realiza la representación lineal típica en dos ejes, esta función puede generar varias gráficas en una, permitiendo así la intercomparación de datos (Follos Pliego, 2012), por lo anterior se escoge esta función para representar las concentración de los contaminantes a analizar PST, PM10, NO2 y SO2, que se miden en 16 campañas de monitoreo durante el periodo 2013 al 2016.

El tratamiento de datos se realizó a partir del software R y se utilizó la función mencionada anteriormente para la representación gráfica de datos, que dio como resultado 8 figuras (Figura 15 a la 22) que representan la variación temporal de los contaminantes en mención desde el año 2013 al 2016. En cada estación, anualmente se muestran los 18 valores de concentración de contaminantes para cada punto de monitoreo.

Adicional a lo anterior, en cada gráfica se utilizó la función *RollingMean* del software R, que generó un parámetro nuevo en el conjunto de datos, en este caso una línea horizontal, que representa el valor límite permisible establecido en la normatividad nacional, en este caso se evaluó las concentraciones de los contaminantes en estudio frente a los límites máximos permisibles diarios y anuales.

#### ***7.2.2.2 Análisis con información complementaria.***

Se relacionaron las condiciones meteorológicas, producción de petróleo, topográficas y condiciones del terreno del área de estudio con el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos, considerando su influencia en el transporte y dispersión de los mismos. Las variables meteorológicas que se relacionan con los contaminantes atmosféricos son la dirección y velocidad del viento y precipitación, obtenida anteriormente en la información preliminar del estudio. Además, se relaciona la producción del petróleo con la calidad

atmosférica, y se tiene en cuenta la población para identificar a los expuestos por la calidad del aire en el Bloque Cubarral.

### ***7.2.2.3 Evaluación del cumplimiento normativo.***

La evaluación del cumplimiento normativo se realizó a partir de los requerimientos establecidos en el artículo 2 de la Resolución 610 de 2010, que dicta los límites máximos permisibles de concentración de contaminantes criterio, relacionados en la Tabla 4. Se aclara que la Resolución 610 de 2010 se encuentra derogada por la Resolución 2254 de 2017, sin embargo, el periodo de estudio se encuentra dentro de la vigencia de la Resolución 610 de 2010 y por lo tanto se utiliza esta para evaluar el cumplimiento normativo.

### ***7.2.2.4 Cálculo del ICA.***

El cálculo del ICA, se realiza según el modelo desarrollado por la EPA, el cual consta de un algoritmo de cálculo para la obtención de los subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire, este algoritmo involucra la utilización de funciones segmentadas basadas en dos puntos (rango).

Posteriormente, para evaluar los efectos de las concentraciones de los contaminantes en la salud de la población, se realiza el cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA), el cual se determina únicamente a los valores máximos de concentración del contaminante  $PM_{10}$  obtenidos de los resultados estadísticos de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacias, Castilla I, Castilla II y Chichimene de Ecopetrol. El ICA se realiza únicamente a este contaminante considerando que para el PST no existen valores establecidos para el cálculo del ICA, además se realiza únicamente a los valores máximos de concentración encontrados, para establecer cuál fue el peor escenario de calidad del aire en las estaciones del bloque Cubarral durante el periodo de estudio. Para lo cual se utiliza la Ecuación 1 y se relaciona con la Tabla 6, mencionada anteriormente.

$$ICA = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} * (C_i - BP_{LO}) + I_{LO}$$

*Ecuación 1: Cálculo del ICA.*

Dónde:

**ICA** = Índice de calidad del aire

**I<sub>LO</sub>** = Valor del índice en el límite inferior de la categoría del ICA

**I<sub>HI</sub>** = Valor del índice en el límite superior de la categoría del ICA

**BP<sub>LO</sub>** = Punto de corte de la concentración en el límite inferior de la categoría del ICA

**BP<sub>HI</sub>** = Punto de corte de la concentración en el límite superior de la categoría del ICA

**C<sub>i</sub>** = Concentración del contaminante

### **7.3 FASE III: Consolidación de la propuesta metodológica.**

Para el inicio de la propuesta metodológica, se definieron las limitaciones del estudio que por falta de información no pudieron ser aplicados al análisis multitemporal de los contaminantes en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral, es decir, para el desarrollo del proyecto se encontró limitación en relación a la falta de información de las variables meteorológicas, las condiciones topográficas, el seguimiento de las diferentes actividades de las estaciones que se desarrollan durante el año y que tienen incidencia en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos y además, la población expuesta y más vulnerable a la calidad del aire de la región. Sin embargo, para el desarrollo de la propuesta metodológica, estas variables se consideran importantes incluirlas para relacionarlas con el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo de diferentes campos petroleros.

En esta fase se formularon las actividades requeridas para la propuesta metodológica para el estudio de cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo,

realizado a partir de los resultados del análisis de comportamiento de los contaminantes en las estaciones Acacías, Castilla I, Castilla II y Chichimene en el Bloque Cubarral, durante el periodo 2013-2016. La propuesta metodológica se realiza para brindar un apoyo al estudio de los cambios en la calidad del aire a través del análisis multitemporal y estadístico.

La metodología va enfocada a estaciones de recolección y tratamiento de crudo de otros campos de producción petrolera en razón a que el área del caso de estudio son las estaciones del Bloque Cubarral. En la elaboración de la propuesta metodológica se formularon 3 procedimientos principales (i) Recolección de información secundaria (ii) Tratamiento de datos y (iii) Análisis de la información.

## 8. Resultados: y Análisis de Resultados

### 8.1 FASE I: Identificación, validación y recopilación de las variables de estudio.

#### 8.1.1 Validación de la información secundaria.

Se realizó la validación a los datos de concentración de los contaminantes atmosféricos a evaluar PST, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> monitoreados durante el periodo 2013 al 2016. Los datos fueron obtenidos de los informes de calidad del aire de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacias, Castilla I, Castilla II y Chichimene de Ecopetrol S.A. y posteriormente tabulados en hojas de Microsoft Excel. Para la validación se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

1. Prueba total de datos: Se validó que en todas las celdas de la base de datos existen datos de concentración de los contaminantes evaluados, es decir, no se encontró ninguna celda vacía o con falta de datos. En este criterio también se verificó que los datos existentes son numéricos y en ningún caso alfabéticos o alfanuméricos.
2. Datos atípicos: Teniendo en consideración que un dato atípico es un valor que numéricamente está distante del resto de los datos, se determinó que aunque existen valores con concentraciones muy altas (máxima concentración 189,94 µg/m<sup>3</sup> para PST, 68,3 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>, 19,4 µg/m<sup>3</sup> para SO<sub>2</sub> µg/m<sup>3</sup> y 5,2 µg/m<sup>3</sup> para NO<sub>2</sub>) y muy bajas (mínima concentración 0,7 µg/m<sup>3</sup> para PST, 0,4 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>, 0,27 µg/m<sup>3</sup> para SO<sub>2</sub> y 0,24 µg/m<sup>3</sup> para NO<sub>2</sub>), estas se encuentran dentro de los valores normales de concentración de los contaminantes evaluados para las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral durante el periodo de estudio. Se realiza la aclaración que, aunque el rango de los datos de concentración sea alto, se verifica que según los datos de precipitación para los años 2015 y 2016, en días de alta precipitación se presentaron los valores más bajos de concentración de contaminantes y en días de nula o poca lluvia se presentaron los valores más altos.

3. Relaciones entre parámetros: Se realiza la correlación entre los contaminantes PST y PM<sub>10</sub>, considerando lo indicado según la “Guía práctica para la validación de datos en los Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire – SVCA existentes en Colombia - GPDV” que afirma que la concentración de PM<sub>10</sub> nunca podrá ser mayor que la concentración de PST. A partir de lo anterior, se valida que los datos de PM<sub>10</sub> en todos los casos, son de menor concentración que los de PST.

4. Valores negativos: No se encuentra ningún valor negativo en la base de datos de concentración de PST, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> durante el periodo de estudio.

### 8.1.2 Estructura de la base de datos.

A continuación, en la Tabla 8, se observa la estructura de la base de datos generada a partir de los monitoreos de calidad del aire realizados en las estaciones de tratamiento y recolección de crudo del Bloque Cubarral, durante el periodo 2013 al 2016, en donde analizaron los contaminantes criterio PST, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas precipitación, velocidad y dirección del viento, también se presentan las unidades de cada variable analizada. La “x” significa la disponibilidad de información de contaminantes y/o variables meteorológicas para el análisis.

Tabla 8. *Campañas de monitoreo calidad del aire 2013-2016.*

| Fecha | Estación   | Punto | PST<br>(µg/m <sup>3</sup> ) | PM <sub>10</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> ) | SO <sub>2</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> ) | NO <sub>2</sub><br>(µg/m <sup>3</sup> ) | Dir.<br>Viento<br>(°) | Vel.<br>Viento<br>(m/s) | Precipita<br>ción<br>(mm) |
|-------|------------|-------|-----------------------------|--|---|---|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| 2013  | Chichimene | 1     | X                           | X  | X                                       | X                                       |                       |                         | X                         |
|       |            | 2     |                             |  |   |   |                       |                         |                           |
|       |            | 3     |                             |  |   |   |                       |                         |                           |
|       | Acacias    | 1     | X                           | X  | X                                       | X                                       |                       |                         | X                         |
|       |            | 2     |                             |  |   |   |                       |                         |                           |
|       |            | 3     |                             |  |   |   |                       |                         |                           |
|       |            | 4     |                             |  |   |   |                       |                         |                           |

Tabla 8. Continuación

|            |             |            |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------|-------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
|            | Castilla I  | 1          | X | X | X | X |   |   | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Castilla II | 1          | X | X | X | X |   |   | X |   |
| 2014       | Chichimene  | 1          | X | X | X | X |   |   | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Acacías     | 1          | X | X | X | X |   |   | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Castilla I  | 1          | X | X | X | X |   |   | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Castilla II | 1          | X | X | X | X |   |   | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2015       | Chichimene  | 1          | X | X | X | X | X | X | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Acacías     | 1          | X | X | X | X | X | X | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 4          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Castilla I  | 1          | X | X | X | X | X | X | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            | Castilla II | 1          | X | X | X | X | X | X | X |   |
|            | 2016        | Chichimene | 1 | X | X | X | X | X | X | X |
|            |             |            | 2 |   |   |   |   |   |   |   |
| Acacías    |             | 1          | X | X | X | X | X | X | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 3          |   |   |   |   |   |   |   |   |
|            |             | 4          |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Castilla I |             | 1          | X | X | X | X | X | X | X |   |
|            |             | 2          |   |   |   |   |   |   |   |   |

Tabla 8. Continuación

|  |                |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |                | 3 |   |   |   |   |   |   |   |
|  | Castilla<br>II | 1 | X | X | X | X | X | X | X |

*Nota:* La “x” representa la disponibilidad de información de contaminantes y variables meteorológicas que se utilizan en el análisis del presente proyecto. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

### 8.1.3 Información preliminar del área de estudio.

#### 8.1.3.1 Campo Castilla.

El campo Castilla del Bloque Cubarral comprende las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Castilla I y Castilla II, se encuentra en jurisdicción del municipio de Castilla La Nueva.

##### 8.1.3.1.1 Población.

La población fue obtenida de la información estadística del (DANE, 2008), lo cual indica para los municipios de Castilla La Nueva durante los años 2013 al 2016 una proyección de la siguiente cantidad de habitantes:

Tabla 9: *Proyección de la población del municipio de Castilla La Nueva para los años 2013 al 2016.*

| Municipio/año     | 2013 (hab) | 2014 (hab) | 2015 (hab) | 2016 (hab) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| Castilla La Nueva | 9.055      | 9.333      | 9.612      | 9.899      |

*Nota:* Proyección de habitantes del municipio de Castilla La Nueva – Meta, durante los años 2013 al 2016. Adaptado de (DANE, 2008)

##### 8.1.3.1.2 Producción de petróleo.

La producción de petróleo diaria estimada para el Campo Castilla se obtuvo de la información estadística de producción de crudo la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2017) para el

mes de diciembre de los años 2013 al 2016, teniendo en cuenta que los monitoreos de calidad del aire fueron realizados en este mes.

Tabla 10: *Producción de petróleo estimada para el Campo Castilla durante el periodo 2013 al 2016.*

| <b>Campo</b>  | <b>2013 (Bpd)</b> | <b>2014 (Bpd)</b> | <b>2015 (Bpd)</b> | <b>2016 (Bpd)</b> |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Castilla (Est. Acacías,<br>Castilla I, Castilla II) | 106.733           | 106.275           | 126.945           | 115.443           |

*Nota:* Producción de crudo estimada en barriles diarios de petróleo para el Campo Castilla, estaciones Acacías, Castilla I y Castilla II, durante el periodo 2013 al 2016. Adaptado de (ANH, 2017)

### **8.1.3.2 Campo Chichimene.**

El campo Chichimene del Bloque Cubarral comprende la estación de recolección y tratamiento de crudo Chichimene, esta se encuentra en jurisdicción de los municipios de Acacías y Guamal.

#### **8.1.3.2.1 Población.**

La población fue obtenida de la información estadística del (DANE, 2008), lo cual indica para los municipios de Acacías y Guamal durante los años 2013 al 2016 una proyección de la siguiente cantidad de habitantes:

Tabla 11. *Proyección de la población de los municipios de Acacías y Guamal para los años 2013 al 2016.*

| <b>Municipio/año</b> | <b>2013 (hab)</b> | <b>2014 (hab)</b> | <b>2015 (hab)</b> | <b>2016 (hab)</b> |
|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Acacías              | 65.800            | 67.347            | 68.888            | 70.469            |
| Guamal               | 9.282             | 9.322             | 9.366             | 9.403             |

*Nota:* Proyección de habitantes del municipio de Acacías y Guamal del departamento del Meta, durante los años 2013 al 2016. Adaptado de (DANE, 2008)

### 8.1.3.2.2 Producción de petróleo.

La producción de petróleo diaria estimada para el Campo Chichimene se obtuvo de la información estadística de producción de crudo la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, 2017) para el mes de diciembre de los años 2013 al 2016, teniendo en cuenta que los monitoreos de calidad del aire fueron realizados en este mes.

Tabla 12. *Producción de petróleo estimada para el Campo Chichimene durante el periodo 2013 al 2016.*

| <b>Campo</b>                 | <b>2013 (Bpd)</b> | <b>2014 (Bpd)</b> | <b>2015 (Bpd)</b> | <b>2016 (Bpd)</b> |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Chichimene (Est. Chichimene) | 46885             | 75325             | 77115             | 71370             |

*Nota:* Producción de crudo estimada en barriles diarios de petróleo para el Campo Chichimene conformada por la estación Chichimene, durante el periodo 2013 al 2016. Adaptado de (ANH, 2017)

Se consideró la población expuesta por la calidad del aire en el Bloque Cubarral, teniendo en cuenta que se han obtenido quejas y reclamos por la percepción que tienen algunos habitantes del sector sobre la mala calidad del aire causada, según ellos, por las actividades de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo; y donde la Oficina de Participación Ciudadana de Ecopetrol, base Orinoquía, ha determinado que los municipios que más perciben afectación por la calidad del aire son Acacías y Castilla La Nueva.

### 8.1.3.3 Topografía y condiciones del terreno.

El Bloque Cubarral está caracterizado por ser una zona plana y levemente ondulada, tiene una altitud de alrededor 530 metros sobre el nivel del mar (Ecopetrol S.A., 2015), al estar ubicado en un entorno llano, constituye una condición geográfica favorable para la circulación horizontal de las masas de aire y con ellas la dispersión de los contaminantes. Según la información suministrada por los monitoreos de calidad del aire, la mayoría de vías del sector se encuentran destapadas, lo que propicia a generar emisiones de material particulado.

#### ***8.1.3.4 Condiciones meteorológicas.***

##### *8.1.3.4.1 Rosas de vientos.*

Posteriormente, debido a la importancia de la rosa de vientos en los estudios de calidad del aire, ya que permite determinar la distribución de la dirección y velocidad del viento con respecto al tiempo y así estar al tanto de la influencia que tiene la concentración de los compuestos que contaminan la atmosfera del lugar de estudio (Gonzalez Velandia, 2015), se presentaron las rosas de vientos contenidas en los informes técnicos, en este caso para los años 2015 y 2016. Figuras 5 y 6.

Cabe mencionar que para los años 2013 y 2014, los monitoreos de calidad del aire no registraron datos de las variables dirección y velocidad del viento, por lo tanto, no se presentó información para estos años.

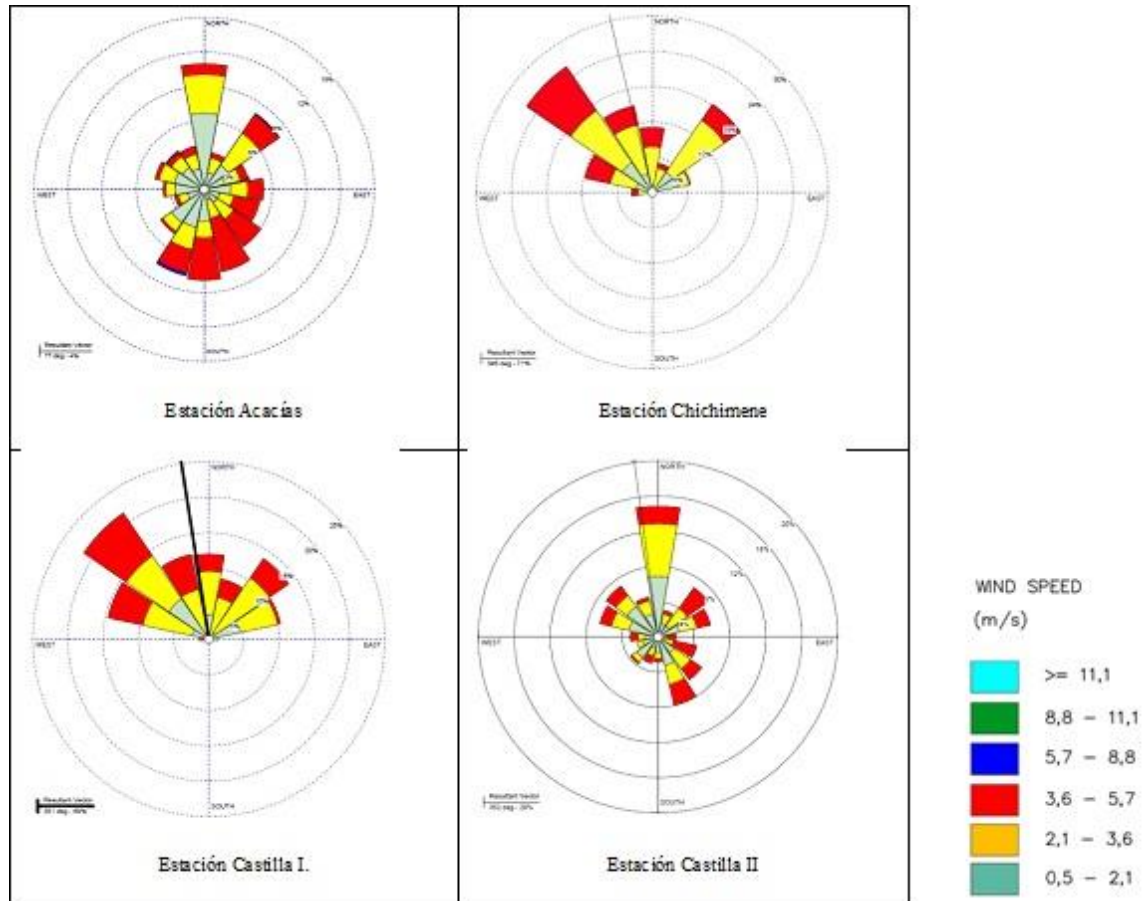
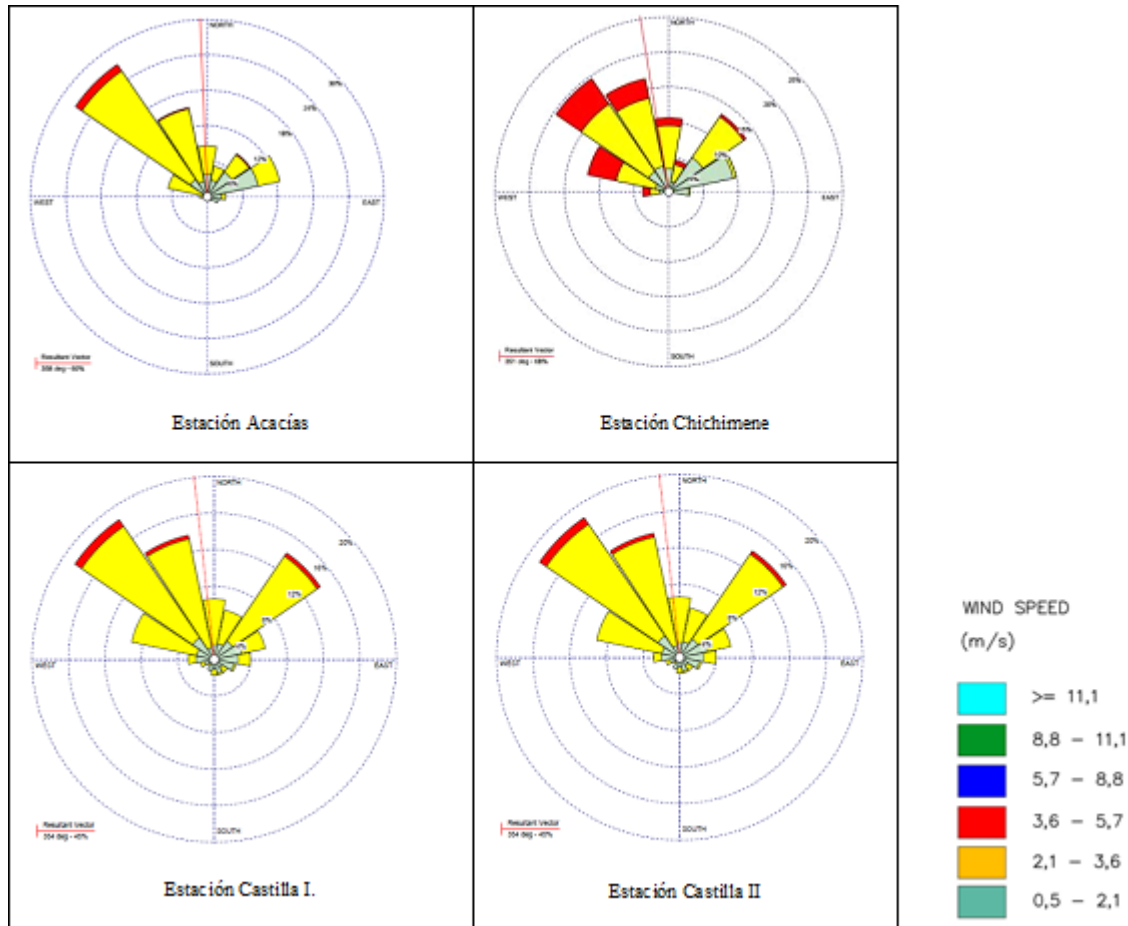


Figura 5. Rosa de vientos para las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Chichimene, Castilla I, Castilla II, año 2015. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2015.

Según los resultados presentados en la Figura 5, para el año 2015 en la estación Acacías la mayoría de vientos provienen del Este y se dirigen hacia el Oeste, predominan velocidades entre 3,6m/s y 5,7m/s, es decir, vientos denominados como brisa débil a brisa moderada. En la estación Chichimene y Castilla I predominan los vientos que provienen de Nor-oeste y se dirigen hacia el Sur-Este; y en la estación Castilla II la mayoría de los vientos provienen del Norte y se dirigen hacia el Sur, en las tres estaciones predominan velocidades entre 2,1m/s y 5,7m/s, es decir, vientos denominados como brisa muy débil a brisa moderada. Según los resultados de las rosas de vientos, se presentan brisas que tienen poca influencia en el transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos, sin embargo, al encontrarse la estación Castilla I al Sur de la estación Castilla II y siendo estas dos tan cercanas, se debe considerar que los vientos de la

estación Castilla I tienen incidencia a arrastrar los contaminantes hacia el sector donde se encuentra la estación Castilla II, por lo que esta sería la más afectada.



*Figura 6:* Rosa de vientos para las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacias, Chichimene, Castilla I, Castilla II, año 2016. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2016.

Según los resultados presentados en la Figura 6, para el año 2016 en la estación Acacias predominan los vientos que provienen del Norte y se dirigen hacia el Sur; en la estación Chichimene, Castilla I y Castilla II la mayoría de vientos provienen del Nor-Oeste y se dirigen hacia el Sur-Este. En todas las estaciones de recolección y tratamiento de crudo predominaron velocidades entre 2,1 m/s y 3,6 m/s, que se definen desde brisa muy débil a brisa moderada. Así como los resultados de las rosas de vientos del año 2015, se presentan brisas que tienen poca influencia en el transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos.

### 8.1.3.4.2 Precipitación.

Teniendo en cuenta que esta variable puede promover la disminución de la concentración de contaminantes en el aire, se incluyeron las gráficas de precipitación de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo obtenidas de los informes técnicos de calidad del aire para los años 2015 – 2016.

Así como ocurre con las rosas de vientos, para los años 2013 y 2014, los monitoreos de calidad del aire no presentaron datos de precipitación que permita relacionar esta variable con el comportamiento de los contaminantes atmosféricos.

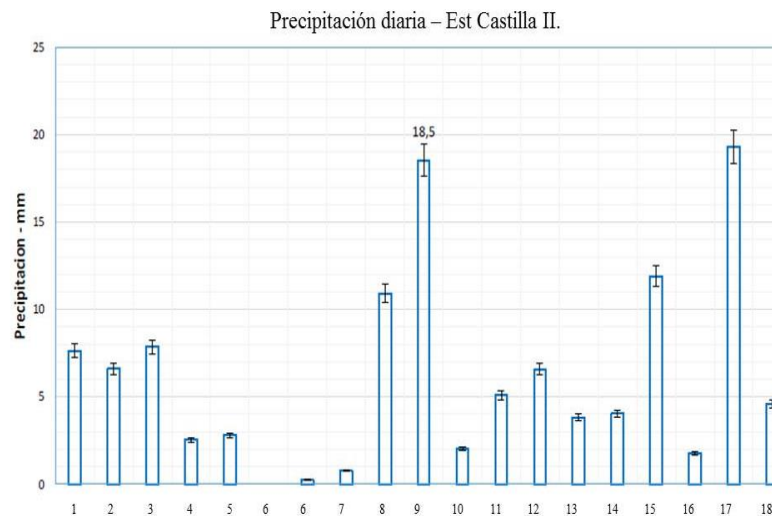


Figura 7: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla II del año 2015. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2015.

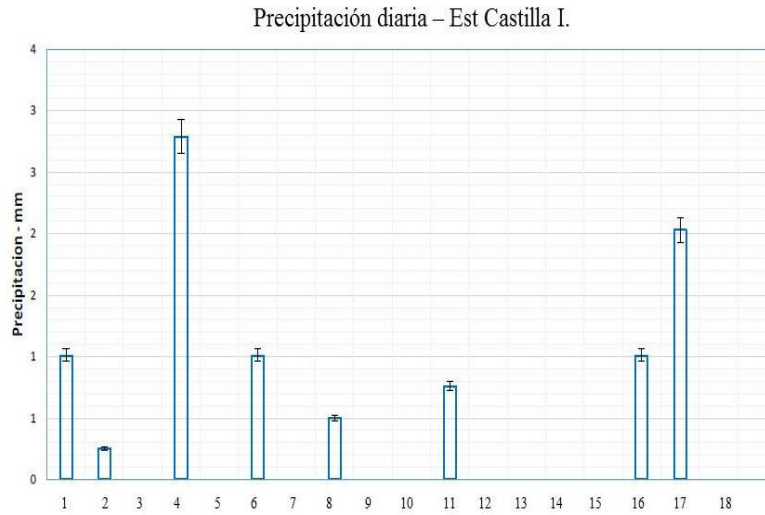


Figura 8: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla I del año 2015. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2015.

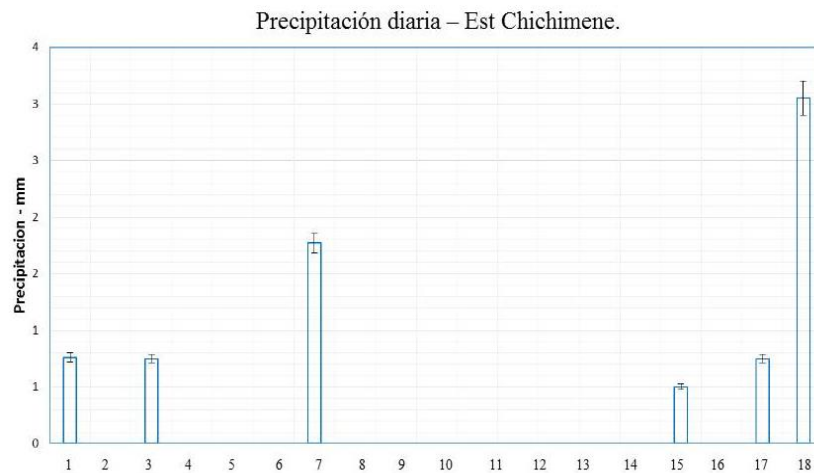
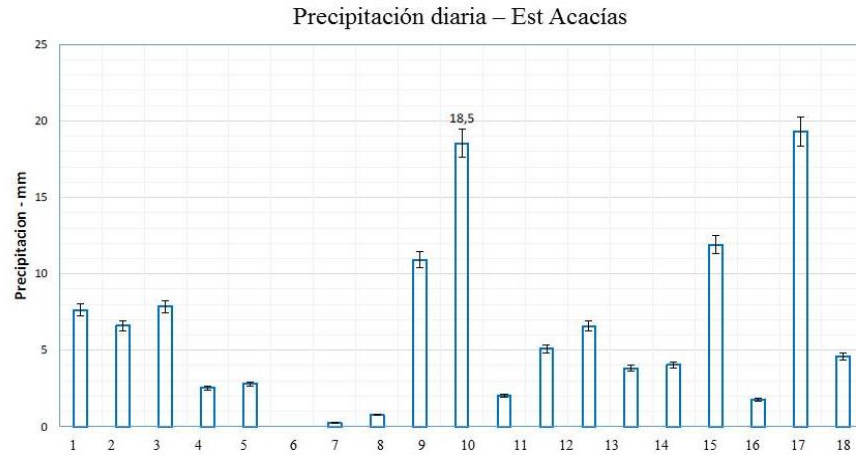


Figura 9: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Chichimene del año 2015. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2015.



*Figura 10:* Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Acacias del año 2015. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2015.

Según los resultados presentados en las figuras 7, 8, 9 y 10, para el año 2015 en la estación Castilla II y Acacias se presentó la mayor precipitación en los días de monitoreo, en comparación con las otras estaciones, con un valor máximo de 18,5mm al día. Para estas dos estaciones se presentaron precipitaciones en casi todos los días de monitoreo, sin embargo cada día se diferencia por su cantidad. La estación Chichimene y Castilla I se caracterizaron por sus bajas precipitaciones, alcanzando un valor máximo de 3mm de precipitación al día, y caracterizándose por sus condiciones secas en la mayoría de los días de monitoreo. Al relacionar esta variable con la concentración de los contaminantes atmosféricos para el año 2015, se destaca que en días de mayor precipitación se presentaron las concentraciones más bajas de los contaminantes estudiados y en días de precipitación nula o muy baja, concentraciones altas en la mayoría de casos.

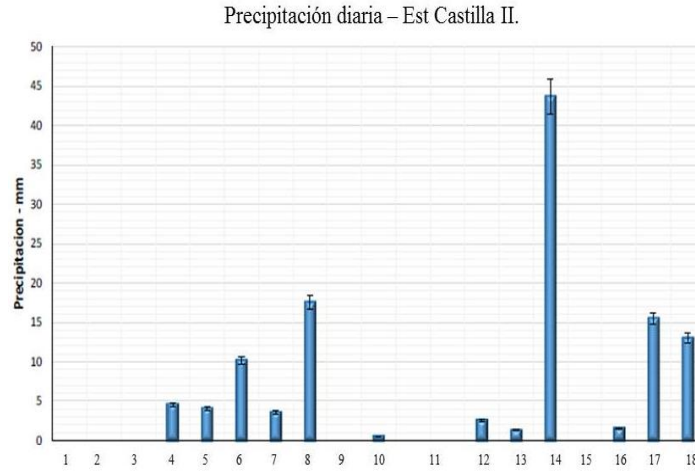


Figura 11: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla II del año 2016. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2016

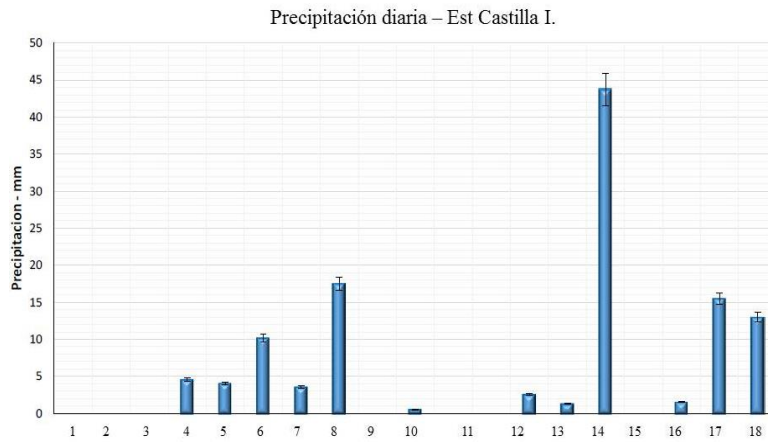


Figura 12: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Castilla I del año 2016. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2016

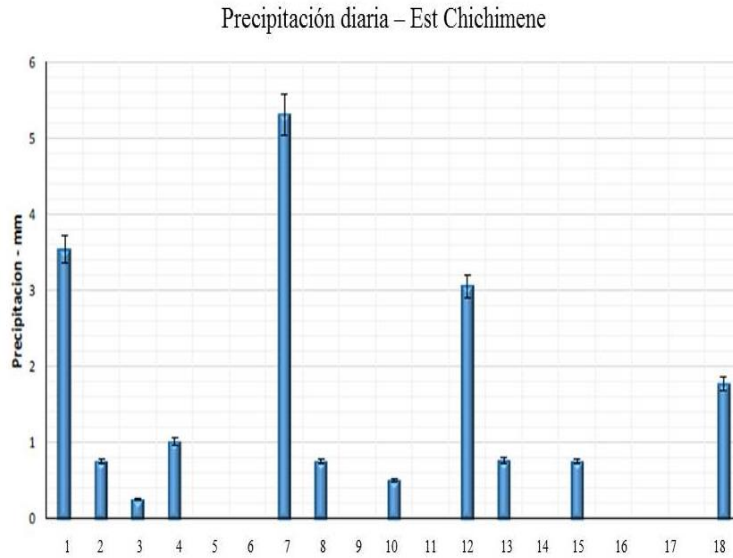


Figura 13: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Chichimene del año 2016. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2016

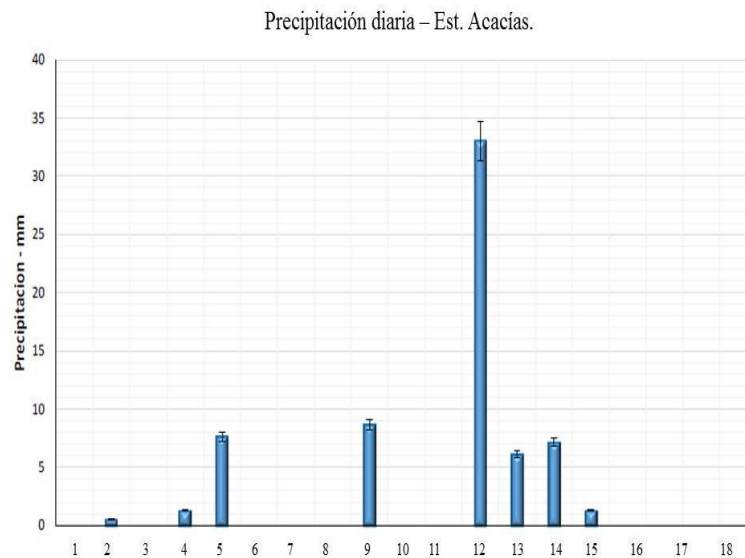


Figura 14: Precipitación durante los 18 días de monitoreo de la estación Acacias del año 2016. Adaptado de Informes de monitoreo de calidad del aire de cada estación, realizados para el año 2016

Según los resultados presentados en las figuras 11, 12, 13 y 14 para el año 2016 en la estación Castilla I y Castilla II se presentó la mayor precipitación en los días de monitoreo, en comparación con las demás estaciones, con un valor máximo de 44mm al día. Sin embargo, se

aclara que en 6 de los 18 días no se presentaron precipitaciones y los demás días registraron cantidades variadas de esta variable. La estación Acacias presentó una precipitación máxima de 34mm al día, y en 10 de los 18 días de monitoreo no se registró precipitación. La estación Chichimene se caracterizó por sus bajas precipitaciones, alcanzando un valor máximo de 5mm de precipitación al día, y en la mayoría de días de monitoreo se registró lluvias con baja cantidad de precipitación. Al relacionar esta variable con la concentración de los contaminantes atmosféricos estudiados para el año 2016, se destaca que en días de mayor precipitación se presentaron las concentraciones más bajas de los contaminantes estudiados y en días de precipitación nula o muy baja, concentraciones altas, por lo que se evidencia la influencia de esta variable en el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos.

## **8.2 FASE II: Análisis estadístico y multitemporal de la información**

A continuación, se presenta el análisis estadístico y multitemporal de los contaminantes atmosféricos en dos grupos de contaminantes, agrupándolos de acuerdo al estado en que se encuentran en el ambiente, el primer grupo son las partículas PST y PM<sub>10</sub> y el segundo grupo son los gases SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>, durante el periodo 2013-2016 en las estaciones Acacias, Chichimene, Castilla I y Castilla II. A continuación, se muestra el análisis estadístico y multitemporal de cada estación. En las Tablas 13, 15, 17 y 19 se presenta los resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM<sub>10</sub> para las cuatro estaciones.

Se resaltan en rojo los valores máximos y en azul los valores mínimos de las medidas estadísticas aplicadas. Teniendo en cuenta que las concentraciones de los contaminantes atmosféricos puede presentar valores extremos que afectan visiblemente el promedio de las concentraciones, se analizó la mediana y no la media como medida de tendencia central.

### **8.2.1 Análisis estadístico para la estación Acacias.**

Tabla 13. *Resultados de las medidas estadísticas de la estación Acacias durante los años 2013-2016*



Tabla 13. Continuación

|                                     |                  |     |      |      |   |       |      |       |        |      |      |
|-------------------------------------|------------------|-----|------|------|---|-------|------|-------|--------|------|------|
|                                     | PM <sub>10</sub> | 7,9 | 51,4 | 43,5 | 18                                      | 21,84 | 15,9 | 12,65 | 57,92% | 0,79 | 1,26 |
| Cont. Crit.= Contaminante criterio  |                  |     |      |      | $\tilde{x}$ = Mediana                   |       |      |       |        |      |      |
| Min= Mínimo                         |                  |     |      |      | S= Desviación estándar                  |       |      |       |        |      |      |
| Max= Máximo                         |                  |     |      |      | CV= Coeficiente de variación            |       |      |       |        |      |      |
| R= Rango                            |                  |     |      |      | Ks= Curtosis                            |       |      |       |        |      |      |
| $\chi$ = Media                      |                  |     |      |      | As= Coeficiente de Asimetría.           |       |      |       |        |      |      |
| PST= Partículas Suspendidas Totales |                  |     |      |      | PM <sub>10</sub> = Material Particulado |       |      |       |        |      |      |

*Nota:* Resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM<sub>10</sub> para los cuatro puntos de monitoreo de la estación Acacias durante los años 2013-2016. Por Glenn Lorena Vivas, 2018

En la Tabla 13 se presentan los valores obtenidos en las medidas estadísticas aplicadas a los puntos de monitoreo de calidad del aire de la estación Acacias durante los años de estudio, que indican:

El año 2013 se caracterizó por no presentar concentraciones de contaminantes PST y PM<sub>10</sub> muy altas o muy bajas en comparación con los demás años de estudio, con valores máximos de 56,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 23,86  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, y valores mínimos de 2,18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 0,85  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de variación indica que en este año no se presentó gran dispersión de los contaminantes, teniendo el menor coeficiente de variación después del año 2016. El coeficiente de asimetría para casi todos los puntos de monitoreo presentó valores positivos, lo que indica que en este año la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media. La curtosis para casi todos los puntos de monitoreo en este año fue negativa, indicando que tienen una reducida concentración alrededor de la mediana.

Se destaca el año 2014 por presentar la concentración de contaminantes más alta durante el periodo de estudio, con valores de 127,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 56,06  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, siendo además el año que presentó el promedio de concentraciones más alto para los dos contaminantes en estudio, con valores de 37,394  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 14,964  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de variación indica que este año se presentó gran dispersión de los contaminantes, teniendo el mayor coeficiente de variación después del año 2015, además se resalta que este año presentó el rango más alto de concentración de contaminantes, por lo que, aunque se registran

concentraciones muy altas, también se reportaron concentraciones muy bajas de los contaminantes PST y  $PM_{10}$ . El coeficiente de asimetría para todos los puntos de monitoreo presentó valores positivos, lo que indica que en este año los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media. La curtosis para casi todos los puntos de monitoreo en este año fue positiva, indicando que los datos tienen un elevado grado de concentración alrededor de la mediana.

El año 2015 presentó la concentración de contaminantes más baja durante el periodo de estudio, con valores de  $0,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $0,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$ , siendo además el año que registró el promedio de concentraciones más bajo, con valores de  $29,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $15,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$ . En este año también se registró el mayor coeficiente de variación, en comparación con todos los años, con porcentajes de 103,41% para PST y 103,46% para  $PM_{10}$ , lo que indica gran heterogeneidad o dispersión en los datos para este año. El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un elevado grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

El año 2016 presentó valores máximos de  $75,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $51,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y valores mínimos de  $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $2,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$ . En este año también se presentó el menor coeficiente de variación de los años de estudio, con porcentajes de 24,46% para PST y 26,80% para  $PM_{10}$ . El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un elevado grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

En las Figuras 15 a la 22 se visualiza los puntos de monitoreo relacionando primero el año y luego el punto de monitoreo, por ejemplo, el primer punto de monitoreo de la estación Acacias del año 2013, se observa en la Figura 15 como 2013-1 y así respectivamente.

### 8.2.2 Análisis multitemporal a partir del software R de la Estación Acacias:

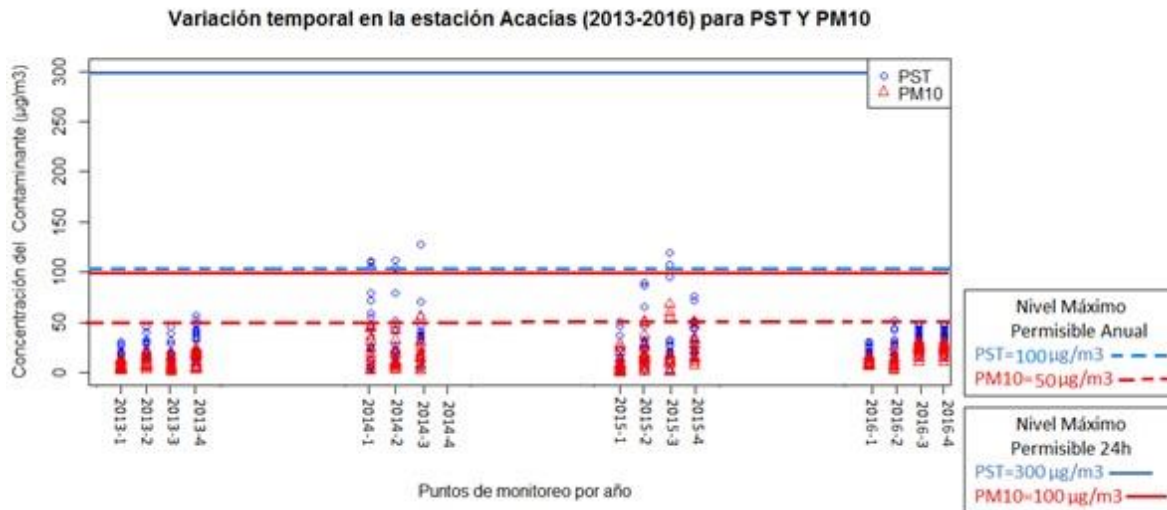


Figura 15: Variación temporal en la estación Acacias durante el periodo 2013 al 2016 para los parámetros PST y PM10. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

En la Figura 15 se presentan los resultados de la variación de la concentración de los contaminantes en la estación Acacias para los años 2013 al 2016. Para analizar el comportamiento de la concentración de los contaminantes en estudio se tomó el valor central por incluir a todos los datos y no los valores máximos del análisis estadístico.

De acuerdo al análisis estadístico –ver Tabla 13- y a lo observado en la Figura 15, tomando en consideración el valor central (mediana) más alto de cada punto de monitoreo para los años en estudio se determinó que en relación al contaminante PST el año 2014 presenta la mayor concentración con un valor de  $37,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , seguido del año 2016 con un valor de  $34,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , luego el año 2013 con un dato de  $36,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y por último el año 2015 con una concentración de  $29,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En lo que respecta al contaminante  $\text{PM}_{10}$ , se evidenció un comportamiento distinto donde el año 2016 presentó la mayor concentración de este contaminante con un valor de  $24,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , seguido del año 2013, con un valor de  $15,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , luego el año 2015, con una concentración de  $15,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y por último el año 2014 con un dato de  $14,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

De acuerdo al coeficiente de variación y lo observado en la Figura 15 se determinó que el año 2015 presentó la mayor variabilidad de los datos en comparación a los demás años de estudio, con un coeficiente de variación de 103,41% para PST y 103,46% para PM<sub>10</sub>, seguido del año 2014, con porcentajes de variación de 87,26% para PST y 85,23% para PM<sub>10</sub>, posterior el año 2013, con porcentajes de 73,28% para PST y 78,99% para PM<sub>10</sub> y por último el año 2016 con un coeficiente de variación de 24,46% para PST y 26,8% para PM<sub>10</sub>.

Con respecto a las variables meteorológicas, se analiza la influencia en el comportamiento de los contaminantes en estudio únicamente para los años 2015 y 2016, tomando como referencia las gráficas de rosas de vientos y precipitación presentadas anteriormente –ver Figura 5 y 6-. Se destaca que para estos años se presentaron brisas débiles a moderadas que tienen poca influencia en la dispersión de los contaminantes en estudio, sin embargo, según las gráficas de precipitación presentados en la Figura 10 para el año 2015 se presentaron precipitaciones altas y bajas durante el monitoreo que pudo tener influencia en la variabilidad de los datos de PST y PM<sub>10</sub>. En el año 2016, según lo presentado en la Figura 14, se presentaron pocas precipitaciones, por lo que pudo incidir en que en este año se haya presentado la menor variabilidad de los datos.

Sobre la topografía y las condiciones del terreno, se destaca que según el PMA del Bloque Cubarral y a los monitoreos de calidad del aire de la estación Acacias, el terreno se caracteriza por generar un desprendimiento de partículas asociadas a las corrientes de aire que aumenta con el paso de vehículos de carga pesada al interior de la locación debido a que la vía se encuentra destapada, lo que pudo influir en las altas concentraciones de los contaminantes PST y PM<sub>10</sub>.

En relación a las actividades propias de la industria, teniendo en cuenta que la estación Acacias hace parte del Campo Castilla, se tomó los datos de producción de crudo de este campo en el mes de diciembre de los años 2013 al 2016, obtenidos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos –ver Tabla 10-, lo que determinó que el año 2015 fue el mayor productor de crudo en comparación con los demás años en estudio, con un estimado de 126.945 Bpd lo que pudo incidir en que registren concentraciones muy altas, con datos máximos de 119,8 µg/m<sup>3</sup> para PST y 68,3 µg/m<sup>3</sup> para PM<sub>10</sub>.

En relación a la población, la estación Acacías se encuentra ubicada dentro del campo Castilla que se encuentra en jurisdicción del municipio de Castilla La Nueva. Según la proyección del DANE –ver Tabla 9-, al año 2016 tendría un estimado de casi de 10.000 habitantes, por lo que esta sería la principal población expuesta al comportamiento de la concentración del material particulado.

De acuerdo con la información presentada, se realiza el cálculo del ICA para el contaminante  $PM_{10}$ , considerando únicamente los valores máximos presentados en el análisis estadístico para relacionar cual es el efecto en la población de las concentraciones máximas presentadas durante los días de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 14: *Cálculo del ICA para  $PM_{10}$  en la estación Acacías.*

| <b>Cálculo de ICA Est Acacías – <math>PM_{10}</math></b> |              |                   |                  |            |                      |
|--|--------------|-------------------|------------------|------------|----------------------|
| <b>Año</b>   | <b>Punto</b> | <b>Cont. Crit</b> | <b>Datos Máx</b> | <b>ICA</b> | <b>Clasificación</b> |
| 2013   | 1            | $PM_{10}$         | 14,13            | 13         | Buena                |
|  | 2            | $PM_{10}$         | 21,16            | 20         | Buena                |
|  | 3            | $PM_{10}$         | 20,71            | 19         | Buena                |
|  | 4            | $PM_{10}$         | 23,86            | 22         | Buena                |
| 2014   | 1            | $PM_{10}$         | 46,51            | 43         | Buena                |
|  | 2            | $PM_{10}$         | 47,21            | 44         | Buena                |
|  | 3            | $PM_{10}$         | 56,06            | 52         | Moderada             |
| 2015   | 1            | $PM_{10}$         | 28,6             | 26         | Buena                |
|  | 2            | $PM_{10}$         | 51,1             | 47         | Buena                |
|  | 3            | $PM_{10}$         | 68,3             | 58         | Moderada             |
|  | 4            | $PM_{10}$         | 23,7             | 22         | Buena                |
| 2016   | 1            | $PM_{10}$         | 16,7             | 15         | Buena                |
|  | 2            | $PM_{10}$         | 25,3             | 23         | Buena                |
|  | 3            | $PM_{10}$         | 31,2             | 29         | Buena                |
|  | 4            | $PM_{10}$         | 51,4             | 48         | Buena                |

*Nota:* Cálculo del ICA considerando únicamente los valores máximos en el análisis estadístico del contaminante  $PM_{10}$  de los puntos de monitoreo de la estación Acacías. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

De acuerdo a los resultados del ICA para PM<sub>10</sub> establecidos en la Tabla 14, se determina que en relación al Material particulado, la estación Acacias presenta en la mayoría de sus casos una calidad del aire “Buena” –color verde-, por lo que según lo establece el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire” no se genera ningún efecto sobre la salud de las personas del área de influencia directa del proyecto. Excepto en el punto 3 de los años 2014 y 2015 donde sus concentraciones máximas alcanzaron ICA con clasificación “Moderada” –color amarillo-, que podría causar posibles síntomas respiratorios en individuos no sensibles y posible agravamiento de enfermedades cardiovasculares.

### 8.2.3 Análisis estadístico Estación Chichimene.

Tabla 15. Resultados de las medidas estadísticas de la estación de Chichimene entre los años 2013 y 2016.

| Resultados estadísticos Est. Chichimene |       |                  |       |       |       |        |       |           |       |        |       |      |
|---|-------|------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|-------|--------|-------|------|
| Año                                     | Punto | Cont. Crit       | Mín   | Máx   | R     | Cuenta | C     | $\bar{x}$ | S     | CV     | Ks    | As   |
| 2013                                    | 1     | PST              | 11,09 | 40,35 | 29,26 | 18     | 25,65 | 23,88     | 8,43  | 32,87% | -0,62 | 0,38 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 4,65  | 18,97 | 14,32 | 18     | 11,13 | 9,79      | 4,34  | 38,99% | -0,89 | 0,51 |
|   | 2     | PST              | 8,69  | 40,4  | 31,71 | 18     | 25,3  | 21,91     | 10,66 | 42,13% | -1,68 | 0,12 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 3,36  | 18,25 | 14,89 | 18     | 10,99 | 9,75      | 5,14  | 46,77% | -1,75 | 0,12 |
|   | 3     | PST              | 8,89  | 40,21 | 31,32 | 18     | 21,36 | 21,94     | 9,37  | 43,87% | -0,71 | 0,34 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 3,47  | 18,9  | 15,43 | 18     | 9,21  | 8,89      | 4,61  | 50,05% | -0,66 | 0,51 |
| 2014                                    | 1     | PST              | 1,67  | 25,34 | 23,67 | 18     | 10,77 | 10,3      | 8,02  | 74,47% | -0,92 | 0,63 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 0,9   | 14,75 | 13,85 | 18     | 6,12  | 5,88      | 4,64  | 75,82% | -0,76 | 0,69 |
|   | 2     | PST              | 3,84  | 48,54 | 44,7  | 18     | 16,73 | 8,04      | 14,6  | 87,27% | -0,18 | 0,98 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 2,21  | 27,18 | 24,97 | 18     | 9,37  | 4,58      | 8,33  | 88,90% | -0,12 | 1,03 |
|   | 3     | PST              | 2,83  | 34,96 | 32,13 | 18     | 12,9  | 8,65      | 10,64 | 82,48% | -0,34 | 0,94 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 1,64  | 19,93 | 18,29 | 18     | 7,28  | 5,07      | 6,03  | 82,83% | -0,41 | 0,9  |
| 2015                                    | 1     | PST              | 17,3  | 48    | 30,7  | 18     | 30,28 | 30,6      | 8,82  | 29,13% | -0,53 | 0,06 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 9,4   | 23,5  | 14,1  | 18     | 15,9  | 16,05     | 4,49  | 28,24% | -1,08 | 0,01 |
|   | 2     | PST              | 12,1  | 51,4  | 39,3  | 18     | 26,33 | 25,25     | 11,42 | 43,37% | -0,2  | 0,7  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 7,3   | 27,7  | 20,4  | 18     | 15,55 | 15,55     | 6,49  | 41,74% | -0,9  | 0,42 |

Tabla 15. Continuación

|                                     |   |                  |     |      |      |   |       |       |      |        |      |      |
|-------------------------------------|---|------------------|-----|------|------|---|-------|-------|------|--------|------|------|
| 2016                                | 1 | PST              | 6,3 | 35,3 | 29   | 18                                      | 19,17 | 17,05 | 7,72 | 40,27% | 0,09 | 0,73 |
|                                     |   | PM <sub>10</sub> | 3,6 | 20,5 | 16,9 | 18                                      | 9,59  | 8,6   | 4,31 | 44,94% | 0,84 | 0,98 |
|                                     | 2 | PST              | 4,1 | 25,5 | 21,4 | 18                                      | 10,76 | 9,85  | 4,98 | 46,28% | 3,63 | 1,67 |
|                                     |   | PM <sub>10</sub> | 2   | 14,8 | 12,8 | 18                                      | 5,82  | 5,35  | 2,92 | 50,17% | 4,52 | 1,89 |
| Cont. Crit.= Contaminante criterio  |   |                  |     |      |      | $\tilde{x}$ =Mediana                    |       |       |      |        |      |      |
| Min= Mínimo                         |   |                  |     |      |      | S= Desviación estándar                  |       |       |      |        |      |      |
| Max= Máximo                         |   |                  |     |      |      | CV=Coeficiente de variación             |       |       |      |        |      |      |
| R= Rango                            |   |                  |     |      |      | Ks= Curtosis                            |       |       |      |        |      |      |
| $\chi$ = Media                      |   |                  |     |      |      | As: Coeficiente de Asimetría            |       |       |      |        |      |      |
| PST= Partículas Suspendidas Totales |   |                  |     |      |      | PM <sub>10</sub> = Material Particulado |       |       |      |        |      |      |

*Nota:* Resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM<sub>10</sub> para los tres puntos de monitoreo de la estación de Chichimene entre los años 2013 y 2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

En la Tabla 15 se presentan los valores obtenidos en las medidas estadísticas aplicadas en la estación Chichimene durante los años de estudio.

En el año 2013 se registró una mediana de 23,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 9,79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, teniendo los valores centrales de concentración de contaminantes más altos después del año 2015. El coeficiente de variación indica que en este año no se presentó gran dispersión de los contaminantes, teniendo el menor coeficiente de variación después del año 2015. El coeficiente de asimetría para todos los puntos de monitoreo presentó valores positivos, lo que indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media. La curtosis para todos los puntos de monitoreo fue negativa, indicando que los datos tienen una reducida concentración alrededor de la mediana.

Se destaca el año 2014 por presentar la concentración de contaminantes más baja durante el periodo de estudio, con valores de 1,67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 0,9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, siendo además el año que presentó la mediana más baja para los dos contaminantes en estudio, con valores de 10,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 5,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de variación indica que este año se presentó la mayor dispersión de los contaminantes, con porcentajes de 87,27% para PST y 88,90% para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de asimetría indicó que en este año los datos estuvieron más

concentrados a la derecha de la media. La curtosis indicó que los datos tienen un reducido grado de concentración alrededor de la mediana.

Se resalta el año 2015 por presentar la concentración de contaminantes más alta durante el periodo de estudio, con valores de  $51,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y para  $27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , además presentó el valor central de concentraciones más alto durante el periodo de estudio, con valores de  $25,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $15,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ . En este año también se registró el menor coeficiente de variación, con porcentajes de 29,13% para PST y 28,24% para  $\text{PM}_{10}$ . El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un reducido grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

El año 2016 registró una mediana de  $17,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , siendo el año de menor concentración después del 2014. En este año también se presentó el mayor coeficiente de variación después del año 2014. El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un elevado grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

#### 8.2.4 Análisis multitemporal a partir del software R de la Estación Chichimene.

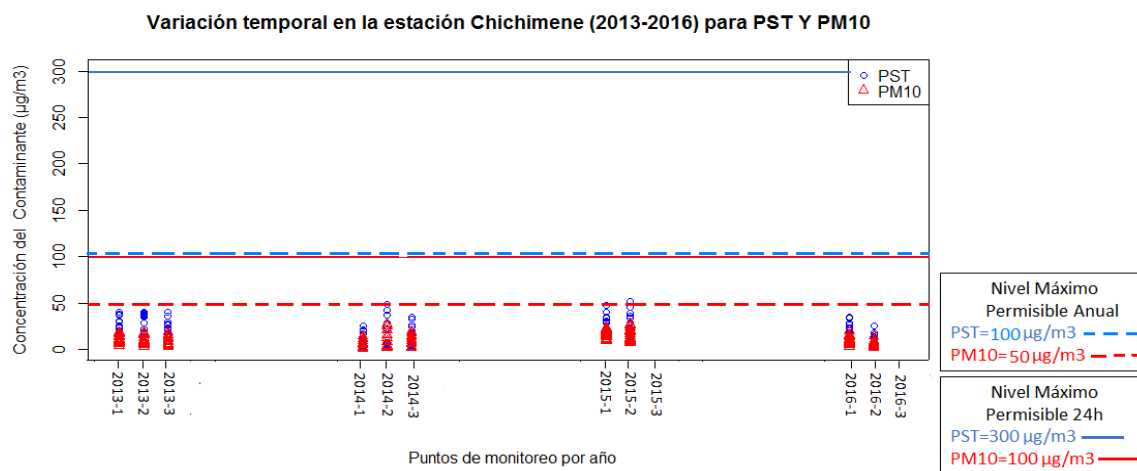


Figura 16: Variación temporal en la estación Chichimene durante el periodo 2013 al 2016 para los parámetros PST y  $\text{PM}_{10}$ . Por Glenny Lorena Vivas, 2018

En relación con la variación temporal de los contaminantes PST y PM<sub>10</sub>, teniendo en cuenta los resultados del análisis estadístico, se destaca que en la estación Chichimene se registran bajas concentraciones en comparación con la estación Acacias y no hay datos que excedan el nivel máximo permisible diario y anual.

Según lo observado en la Figura 16 y tomando los valores centrales de concentración de contaminantes de los resultados estadísticos (Tabla 15) se determinó que el año 2015 presentó la mayor concentración de contaminantes, con valores de 25,25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PST y 15,55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM<sub>10</sub>, seguido del año 2013 con valores de 23,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 9,79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, luego el año 2016 con datos de 17,05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 8,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, y por último el año 2014 con 10,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 5,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>.

En relación a las variables meteorológicas, se analiza la influencia en el comportamiento de los contaminantes en estudio únicamente para los años 2015 y 2016, tomando como referencia las gráficas de rosas de vientos presentadas anteriormente (Figuras 5 y 6). Se destaca que para estos años se presentaron brisas débiles a moderadas, además, según lo presentado en las Figuras 9 y 14, en los días de monitoreo se registraron bajas precipitaciones y condiciones secas en la mayor parte del monitoreo de los años 2015 y 2016, lo que influye en la poca dispersión de los contaminantes atmosféricos. Al encontrarse esta estación alejada de las demás, se tiene en cuenta que los contaminantes generados en las demás estaciones tienen poca probabilidad de ser arrastrados por el viento hacia la estación Chichimene, considerando además que se reportaron bajas velocidades para los años 2015 y 2016 en todas las estaciones.

Con respecto a las actividades propias de la industria, teniendo en cuenta que la estación Chichimene hace parte del Campo Chichimene, se tomó los datos de producción de crudo de este campo, en el mes de diciembre de los años 2013 al 2016, obtenidos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos –ver Tabla 12- , y se evidenció que el año 2015 fue el mayor productor de crudo en comparación con los demás años en estudio, con un estimado de 77.115 Bpd, lo que pudo incidir en el que el año 2015 se presentara las mayores concentraciones de contaminantes PST y

PM<sub>10</sub>. Además, según los informes técnicos, en los días que se realizó el monitoreo para todos los años en estudio, no se observaron construcciones, adecuación o mantenimiento de obras civiles.

En relación a la población, la estación Chichimene se encuentra ubicada dentro del campo Chichimene que se encuentra en jurisdicción del municipio de Acacías y Guamal. Según la proyección del DANE –ver Tabla 11-, al año 2016 tendría un estimado de casi de 80.000 habitantes, por lo que esta sería la principal población expuesta al comportamiento de la concentración del material particulado.

De acuerdo con la información presentada, se realiza el cálculo del ICA para el contaminante PM<sub>10</sub>, considerando únicamente los valores máximos presentados en el análisis estadístico para relacionar cual es el efecto en la población de las concentraciones máximas presentadas durante los días de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 16. *Cálculo del ICA para PM<sub>10</sub> en la estación Chichimene*

| ICA PM <sub>10</sub> Estación Chichimene. |       |                  |       |     |                |
|---|-------|------------------|-------|-----|----------------|
| Año                                       | Punto | Cont. Crit       | Máx   | ICA | Clasificación. |
| <b>2013</b>                               | 1     | PM <sub>10</sub> | 18,97 | 18  | Buena          |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 18,25 | 17  | Buena          |
|   | 3     | PM <sub>10</sub> | 18,9  | 18  | Buena          |
| <b>2014</b>                               | 1     | PM <sub>10</sub> | 14,75 | 14  | Buena          |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 27,18 | 25  | Buena          |
|   | 3     | PM <sub>10</sub> | 19,93 | 18  | Buena          |
| <b>2015</b>                               | 1     | PM <sub>10</sub> | 23,5  | 22  | Buena          |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 27,7  | 26  | Buena          |
| <b>2016</b>                               | 1     | PM <sub>10</sub> | 20,5  | 19  | Buena          |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 14,8  | 14  | Buena          |

*Nota:* Cálculo del ICA considerando únicamente los valores máximos en el análisis estadístico del contaminante PM<sub>10</sub> de los puntos de monitoreo de la estación Chichimene. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

De acuerdo a los resultados del ICA para PM<sub>10</sub> establecidos en la Tabla 16, se determina que en relación al Material particulado, la estación Chichimene presenta en la totalidad de los puntos

una calidad del aire “Buena” –color verde-, por lo que según lo establece el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire” no se genera ningún efecto sobre la salud de las personas del área de influencia directa del proyecto.

### 8.2.5 Análisis estadístico Estación Castilla I:

Tabla 17. Resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM<sub>10</sub> para los tres puntos de monitoreo de la estación de Castilla I entre los años 2013 y 2016.

| Resultados estadísticos - Estación Castilla I |       |                  |       |        |        |        |        |             |       |        |       |       |
|---|-------|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------|--------|-------|-------|
| Año   | Punto | Cont. Crit       | Mín   | Máx    | R      | Cuenta | $\chi$ | $\tilde{x}$ | S     | CV     | Ks    | As    |
| 2013  | 1     | PST              | 3,73  | 45,07  | 41,34  | 18     | 26,32  | 29,26       | 14,01 | 47,88% | -1,54 | -0,2  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 1,7   | 21,6   | 19,9   | 18     | 12,66  | 13,85       | 6,78  | 48,95% | -1,53 | -0,18 |
|   | 2     | PST              | 11,12 | 35,8   | 24,68  | 18     | 21,21  | 20,25       | 7,17  | 35,41% | -0,37 | 0,48  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 5,33  | 18,21  | 12,88  | 18     | 10,35  | 10,12       | 3,61  | 35,67% | -0,07 | 0,64  |
|   | 3     | PST              | 12,82 | 45,49  | 32,67  | 18     | 29,31  | 30,78       | 9,82  | 31,90% | -0,97 | -0,1  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 6,24  | 23,14  | 16,9   | 18     | 14,2   | 14,98       | 4,93  | 32,91% | -0,85 | 0,009 |
| 2014  | 1     | PST              | 9,08  | 33,01  | 23,93  | 18     | 12,55  | 11,31       | 5,35  | 47,30% | 14,25 | 3,62  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 3,72  | 13,21  | 9,49   | 18     | 5,33   | 4,92        | 2,07  | 42,07% | 13,87 | 3,54  |
|   | 2     | PST              | 9,63  | 29,58  | 19,95  | 18     | 13,98  | 13,15       | 4,39  | 33,38% | 9,85  | 2,81  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 3,95  | 13,01  | 9,06   | 18     | 6,12   | 5,78        | 1,95  | 33,74% | 9,65  | 2,74  |
|   | 3     | PST              | 9,39  | 22,72  | 13,33  | 18     | 11,51  | 10,93       | 2,97  | 27,17% | 13,32 | 3,48  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 3,85  | 12,72  | 8,87   | 18     | 6,44   | 6,1         | 1,74  | 28,52% | 10,84 | 2,84  |
| 2015  | 1     | PST              | 26,04 | 111,23 | 85,29  | 18     | 70,01  | 73,36       | 23,35 | 31,83% | -0,6  | -0,36 |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 12,97 | 55,63  | 42,66  | 18     | 34,59  | 36,62       | 12,97 | 35,42% | -0,9  | -0,28 |
|   | 2     | PST              | 29,17 | 139,19 | 110,02 | 18     | 67,19  | 61,43       | 28,45 | 46,31% | 0,85  | 0,95  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 16,35 | 82,17  | 65,82  | 18     | 38,77  | 37,17       | 16,42 | 44,18% | 1,36  | 1     |
|   | 3     | PST              | 29,45 | 91,58  | 62,13  | 18     | 58,21  | 53,73       | 20,7  | 38,53% | -1,21 | 0,34  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 16,52 | 54,95  | 38,43  | 18     | 32,65  | 32,8        | 11,11 | 33,87% | -0,71 | 0,36  |
| 2016  | 1     | PST              | 15,6  | 68,4   | 52,8   | 18     | 30,68  | 28,35       | 12,85 | 45,33% | 3,42  | 1,64  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 6,7   | 32,8   | 26,1   | 18     | 15,36  | 12,75       | 6,65  | 52,16% | 2,35  | 1,55  |
|   | 2     | PST              | 24,7  | 64,4   | 39,7   | 18     | 42,37  | 40,9        | 9,93  | 24,28% | 0,06  | 0,24  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 13,8  | 29,1   | 15,3   | 18     | 22,5   | 22,6        | 4,91  | 21,73% | -1,26 | -0,2  |
|   | 3     | PST              | 13    | 83,3   | 70,3   | 18     | 35,53  | 29,5        | 18,58 | 62,98% | 2,1   | 1,54  |
|   |       | PM <sub>10</sub> | 7,6   | 59,1   | 51,5   | 18     | 21,2   | 18,15       | 12,36 | 68,10% | 4,43  | 1,94  |

Tabla 17. Continuación.

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Cont. Crit.= Contaminante criterio  | $\tilde{x}$ = Mediana                   |
| Min= Mínimo                         | S= Desviación estándar                  |
| Max= Máximo                         | CV= Coeficiente de variación            |
| R= Rango                            | Ks= Curtosis                            |
| $\chi$ = Media                      | As=Coeficiente de curtosis.             |
| PST= Partículas Suspendidas Totales | PM <sub>10</sub> = Material Particulado |

*Nota:* Resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM<sub>10</sub> para los tres puntos de monitoreo de la estación de Castilla I entre los años 2013 y 2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

En la Tabla 17 se presentan los valores obtenidos en las medidas estadísticas aplicadas en la estación Castilla I durante los años de estudio.

El año 2013 se destacó por presentar los datos de concentración más bajos en comparación con los demás años de estudio, con valores de 3,73  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 1,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub> y además presentó los valores centrales más bajos después del año 2014 con datos de 30,78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 14,98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de asimetría para todos los puntos de monitoreo fue muy cercano a 0, lo que indica que existe casi la misma concentración de valores a la derecha y a la izquierda de la media. La curtosis para todos los puntos de monitoreo fue negativa, indicando que los datos tienen una reducida concentración alrededor de la mediana.

Se destaca el año 2014 por presentar la mediana más baja para los dos contaminantes en estudio, con valores de 13,15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 5,78  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de asimetría indicó que en este año los datos estuvieron concentrados a la derecha de la media. La curtosis indicó que los datos tienen un elevado grado de concentración alrededor de la mediana.

Se resalta el año 2015 por presentar los valores centrales de concentraciones más altos durante el periodo de estudio, con valores de 73,36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 36,62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un reducido grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

El año 2016 registró una mediana de  $40,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $22,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , siendo el año de mayor concentración después del 2015. En este año también se presentó el mayor coeficiente en comparación con los demás años de estudio. El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un elevado grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

### 8.2.6 Análisis multitemporal a partir del software R de la Estación Castilla I.

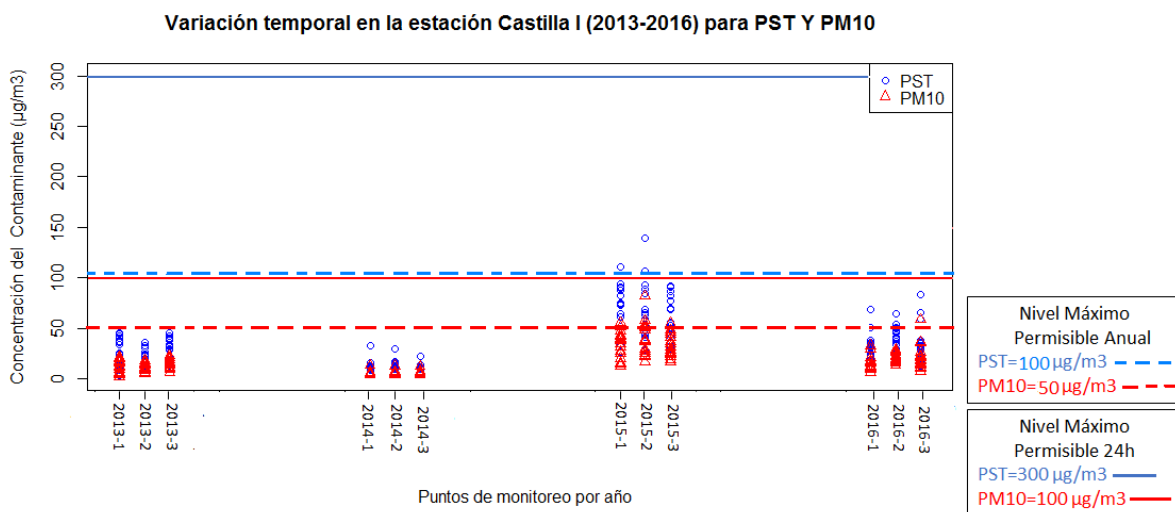


Figura 17: Variación temporal en la estación Castilla I para PST y  $\text{PM}_{10}$  durante el periodo 2013 – 2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

Según lo observado en la Figura 17 y tomando los valores centrales de concentración de contaminantes de los resultados estadísticos se determinó que el año 2015 presentó la mayor concentración de contaminantes, con valores de  $73,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PST y  $36,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{PM}_{10}$ , seguido del año 2016 con valores de  $40,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $22,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , luego el año 2013 con datos de  $30,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $14,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , y por último el año 2014 con valores de  $13,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $5,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ .

En relación a las variables meteorológicas, se analiza la influencia en el comportamiento de los contaminantes en estudio únicamente para los años 2015 y 2016, tomando como referencia las gráficas de rosas de vientos presentadas en las Figuras 5 y 6. Se destaca que en la estación

Castilla I para estos años se presentaron brisas débiles a moderadas que no tienen gran influencia en la dispersión de los contaminantes. Sin embargo, según el análisis de la rosa de vientos, para el año 2015, los vientos de la estación Castilla II estuvieron dirigidos a la estación Castilla I, y al estar estas a menos de 2km de distancia, en este año, la estación Castilla I, pudo verse influenciado por las concentraciones de contaminantes generados en la estación Castilla II. En relación con la precipitación, según lo presentado en las Figuras 8 y 12, en el año 2015 se presentaron bajas precipitaciones que no sobrepasaron los 3mm, contrario al año 2016 donde se registró precipitaciones de 45mm en algunos días de monitoreo.

En relación a las actividades propias de la industria, teniendo en cuenta que la estación Castilla I hace parte del Campo Castilla, se tomó los datos de producción de crudo de este campo, en el mes de diciembre de los años 2013 al 2016, obtenidos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos –ver Tabla 10- , y se evidenció que el año 2015 fue el mayor productor de crudo en comparación con los demás años en estudio, con un estimado de 126.945 Bpd, lo que pudo incidir en el que el año 2015 se presentara las mayores concentraciones de contaminantes PST y PM<sub>10</sub>. Además, se consideró que en los informes de monitoreo se indicó que para el año 2015 se registraron construcciones y adecuaciones de obras, lo que aumentó el tráfico de carga liviana y pesada, lo que incide en el aumento de concentraciones de material particulado.

En relación a la población, la estación Castilla I se encuentra ubicada dentro del campo Castilla que se encuentra en jurisdicción del municipio de Castilla La Nueva. Según la proyección del DANE –ver Tabla 9- , al año 2016 tendría un estimado de casi de 10.000 habitantes, por lo que esta sería la principal población expuesta al comportamiento de la concentración del material particulado.

De acuerdo con la información presentada, se realiza el cálculo del ICA para el contaminante PM<sub>10</sub>, considerando únicamente los valores máximos presentados en el análisis estadístico para relacionar cual es el efecto en la población de las concentraciones máximas presentadas durante los días de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 18. *Cálculo del ICA para PM<sub>10</sub> en la estación Castilla I.*

| Cálculo ICA PM <sub>10</sub> Estación Castilla I. |       |                  |       |     |               |
|---|-------|------------------|-------|-----|---------------|
| Año   | Punto | Cont. Crit       | Máx   | ICA | Clasificación |
| <b>2013</b>                                       | 1     | PM <sub>10</sub> | 21,6  | 20  | Buena         |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 18,21 | 17  | Buena         |
|   | 3     | PM <sub>10</sub> | 23,14 | 21  | Buena         |
| <b>2014</b>                                       | 1     | PM <sub>10</sub> | 13,21 | 12  | Buena         |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 13,01 | 12  | Buena         |
|   | 3     | PM <sub>10</sub> | 12,72 | 12  | Buena         |
| <b>2015</b>                                       | 1     | PM <sub>10</sub> | 55,63 | 51  | Moderada      |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 82,17 | 64  | Moderada      |
|   | 3     | PM <sub>10</sub> | 54,95 | 51  | Moderada      |
| <b>2016</b>                                       | 1     | PM <sub>10</sub> | 32,8  | 30  | Buena         |
|   | 2     | PM <sub>10</sub> | 29,1  | 27  | Buena         |
|   | 3     | PM <sub>10</sub> | 59,1  | 53  | Moderada      |

*Nota:* Cálculo del ICA considerando únicamente los valores máximos en el análisis estadístico del contaminante PM<sub>10</sub> de los puntos de monitoreo de la estación Castilla I. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

De acuerdo a los resultados del ICA para PM<sub>10</sub> establecidos en la Tabla 18, se determina que en relación al Material particulado, la estación Castilla I presentó en los años 2013 y 2014 una calidad del aire “Buena” –color verde-, por lo que según lo establece el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire” no se genera ningún efecto sobre la salud de las personas del área de influencia directa del proyecto. En el año 2015 se presentó un ICA con clasificación “Moderada” –color moderada-, es decir que según las concentraciones de PM<sub>10</sub> en este año, pudo causar posibles síntomas respiratorios en individuos no sensibles y posible agravamiento de enfermedades cardiovasculares. En el año 2016 se presentó en los puntos 1 y 2 un ICA con clasificación “Buena” y en el punto 3 “Moderada”.

## 8.2.7 Análisis estadístico Estación Castilla II.

Tabla 19. Resultados de las medidas estadísticas de la estación de Castilla II entre los años 2013 y 2016.

| Resultados estadísticos - Est. Castilla II |       |                  |       |        |       |        |        |             |       |        |       |       |
|--|-------|------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------------|-------|--------|-------|-------|
| Año  | Punto | Cont. Crit       | Mín   | Máx    | R     | Cuenta | $\chi$ | $\tilde{x}$ | S     | CV     | Ks    | As    |
| 2013                                       | 1     | PST              | 4,25  | 73,1   | 68,85 | 18     | 39,33  | 36,12       | 24,77 | 62,98% | -1,78 | 0,002 |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 1,2   | 19,4   | 18,2  | 18     | 10,6   | 9,5         | 6,54  | 61,70% | -1,72 | 0,01  |
|  | 2     | PST              | 2,17  | 22,95  | 20,78 | 18     | 11,12  | 10,14       | 7,71  | 69,33% | -1,59 | 0,28  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 1,07  | 11,15  | 10,08 | 18     | 5,44   | 4,86        | 3,79  | 69,67% | -1,61 | 0,29  |
|  | 3     | PST              | 2,21  | 39,31  | 37,1  | 18     | 18,22  | 17,97       | 13,27 | 72,83% | -1,44 | 0,19  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 1,01  | 17,31  | 16,3  | 18     | 8,23   | 8,15        | 5,96  | 72,42% | -1,5  | 0,16  |
| 2014                                       | 1     | PST              | 2,5   | 29,91  | 27,41 | 18     | 9,29   | 6,61        | 7,94  | 85,47% | 2,66  | 1,94  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 1,25  | 12,86  | 11,61 | 18     | 4,01   | 2,82        | 3,29  | 82,04% | 2,78  | 1,96  |
|  | 2     | PST              | 3,08  | 10,62  | 7,54  | 18     | 6,5    | 6,41        | 1,85  | 28,46% | 0,43  | 0,08  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 1,26  | 4,78   | 3,52  | 18     | 2,74   | 2,86        | 0,81  | 29,56% | 1,38  | 0,33  |
|  | 3     | PST              | 2,65  | 10,03  | 7,38  | 18     | 6,39   | 6,12        | 2,06  | 32,24% | -0,65 | 0,25  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 1,19  | 4,31   | 3,12  | 18     | 2,68   | 2,59        | 0,83  | 30,97% | -0,37 | 0,38  |
| 2015                                       | 1     | PST              | 9,64  | 89,5   | 79,86 | 18     | 38,68  | 44,26       | 20,65 | 53,39% | 0,51  | 0,49  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 2,53  | 44,24  | 41,71 | 18     | 23,46  | 31,11       | 15,35 | 65,43% | -1,83 | -0,22 |
|  | 2     | PST              | 12,04 | 189,94 | 177,9 | 18     | 56,89  | 50,44       | 40,86 | 71,82% | 6,47  | 2,29  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 8,53  | 39,14  | 30,61 | 18     | 28,31  | 34,38       | 11,43 | 40,37% | -1,2  | -0,8  |
|  | 3     | PST              | 5,84  | 51,95  | 46,11 | 18     | 19,14  | 14,84       | 12,61 | 65,88% | 1,96  | 1,51  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 2,19  | 38,7   | 36,51 | 18     | 12,34  | 8,25        | 11,26 | 91,25% | 1,09  | 1,42  |
| 2016                                       | 1     | PST              | 10,1  | 61,7   | 51,6  | 18     | 37,08  | 38,5        | 14,11 | 38,05% | -0,57 | -0,25 |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 4,8   | 30,2   | 25,4  | 18     | 18,93  | 20,4        | 6,99  | 36,93% | -0,56 | -0,4  |
|  | 2     | PST              | 36,1  | 75,4   | 39,3  | 18     | 45,96  | 43,25       | 10,58 | 23,02% | 2,84  | 1,81  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 17,3  | 47,3   | 30    | 18     | 23,88  | 22,5        | 7,33  | 30,70% | 5,45  | 2,01  |
|  | 3     | PST              | 14,5  | 51,1   | 36,6  | 18     | 26,4   | 24,75       | 9,74  | 36,89% | 1,35  | 1,26  |
|  |       | PM <sub>10</sub> | 9,1   | 30,3   | 21,2  | 18     | 15,75  | 14,8        | 5,88  | 37,33% | 0,85  | 1,06  |

Tabla 19. Continuación

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| Cont. Crit.= Contaminante criterio  | $\tilde{x}$ = Mediana                   |
| Min= Mínimo                         | S= Desviación estándar                  |
| Max= Máximo                         | CV= Coeficiente de variación            |
| R= Rango                            | Ks= Curtosis                            |
| $\chi$ = Media                      | As=Coeficiente de Asimetría.            |
| PST= Partículas Suspendidas Totales | PM <sub>10</sub> = Material Particulado |

*Nota:* Resultados de las medidas estadísticas aplicadas a los datos de PST y PM<sub>10</sub> para los cuatro puntos de monitoreo de la estación de Castilla II entre los años 2013 y 2016.

En la Tabla 19 se presentan los valores obtenidos en las medidas estadísticas aplicadas en la estación Castilla II durante los años de estudio.

El año 2013 se destacó por presentar los datos de concentración más bajos en comparación con los demás años de estudio, con valores de 2,21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 1,01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub> y además presentó los valores centrales más bajos después del año 2014 con datos de 36,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 9,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de asimetría para todos los puntos de monitoreo presentaron datos positivos, sin embargo, estos fueron muy cercanos a 0, lo que indica que existe casi la misma concentración de valores a la derecha y a la izquierda de la media. La curtosis para todos los puntos de monitoreo fue negativa, indicando que los datos tienen una reducida concentración alrededor de la mediana.

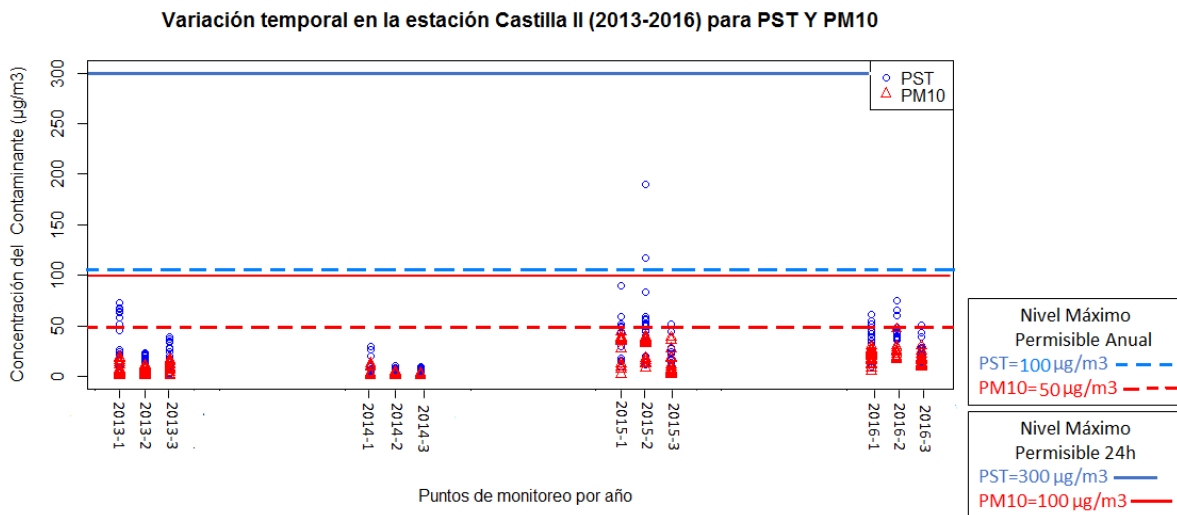
Se destaca el año 2014 por presentar la mediana más baja para los dos contaminantes en estudio, con valores de 6,61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 2,82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>. Este año se presentó el mayor coeficiente de variación, en comparación con los demás años de estudio, con un porcentaje de 85,47% para PST y 82,04% para PM<sub>10</sub>. El coeficiente de asimetría indicó que en este año los datos estuvieron concentrados a la derecha de la media. La curtosis indicó que los datos tienen un elevado grado de concentración alrededor de la mediana.

Se destaca el año 2015 por presentar los datos de concentración más altos en comparación con los demás años de estudio, con valores de 189,94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 39,14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub>, además, también presentó los valores centrales de concentraciones más altos durante el periodo

de estudio, con valores de  $50,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $34,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ . El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un elevado grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

El año 2016 registró una mediana de  $43,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y  $22,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , siendo el año de mayor concentración después del 2015. El coeficiente de asimetría indica que la mayoría de los datos estuvieron más concentrados a la derecha de la media y la curtosis evidencia que hay un elevado grado de concentración de los datos alrededor de la mediana.

### 8.2.8 Análisis multitemporal Estación Castilla II.



*Figura 18:* Variación temporal en la estación Castilla II para los contaminantes PST y  $\text{PM}_{10}$  durante el periodo 2013-2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

En la Figura 18 se presentan los resultados de la variación de la concentración de los contaminantes en la estación Castilla II para los años 2013 al 2016. Para analizar el comportamiento de la concentración de los contaminantes en estudio se tomó el valor central por incluir a todos los datos y no los valores máximos del análisis estadístico.

De acuerdo al análisis estadístico –ver Tabla 19- y a lo observado en la Figura 18, tomando en consideración el valor central más alto de cada punto de monitoreo para los años en estudio se

determinó que el año 2015 presentó la mayor concentración de contaminantes, con un valor de 50,44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 34,38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , seguido del año 2016 con un valor de 43,25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 22,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ , luego el año 2013 con datos de 36,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 9,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$  y por último el año 2014 con una concentración de 6,61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 2,82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ .

En relación a las variables meteorológicas, se analiza la influencia en el comportamiento de los contaminantes en estudio únicamente para los años 2015 y 2016, tomando como referencia las gráficas de rosas de vientos –ver Figuras 5 y 6-. Se destaca que para estos años se presentaron brisas débiles a moderadas que tienen poca influencia en la dispersión de los contaminantes en estudio, sin embargo, según lo reportado en las Figuras 7 y 11 la estación Castilla II presentó las precipitaciones más altas en comparación con las demás estaciones, registrándose en el 2015, precipitaciones hasta de 20mm y en el 2016 valores máximos de 44mm.

En relación a las actividades propias de la industria, teniendo en cuenta que la estación Castilla II hace parte del Campo Castilla, se tomó los datos de producción de crudo de este campo en el mes de diciembre de los años 2013 al 2016, obtenidos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos –ver Tabla 10-, lo que determinó que el año 2015 fue el mayor productor de crudo en comparación con los demás años en estudio, con un estimado de 126.945 Bpd lo que pudo incidir en que se registren concentraciones muy altas, con datos máximos de 189,94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PST y 39,14  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{PM}_{10}$ .

En relación a la población, la estación Castilla II se encuentra ubicada dentro del campo Castilla que se encuentra en jurisdicción del municipio de Castilla La Nueva. Según la proyección del DANE –ver Tabla 9-, al año 2016 tendría un estimado de casi de 10.000 habitantes, por lo que esta sería la principal población expuesta al comportamiento de la concentración del material particulado.

De acuerdo con la información presentada, se realiza el cálculo del ICA para el contaminante  $\text{PM}_{10}$ , considerando únicamente los valores máximos presentados en el análisis estadístico para

relacionar cual es el efecto en la población de las concentraciones máximas presentadas durante los días de monitoreo de calidad del aire.

Tabla 20: *Cálculo del ICA para PM<sub>10</sub> en la estación Castilla II.*

| <b>ICA PM<sub>10</sub> Estación Castilla II.</b> |              |                   |            |            |                      |
|--|--------------|-------------------|------------|------------|----------------------|
| <b>Año</b>                                       | <b>Punto</b> | <b>Cont. Crit</b> | <b>Máx</b> | <b>ICA</b> | <b>Clasificación</b> |
| <b>2013</b>                                      | 1            | PM <sub>10</sub>  | 19,4       | 18         | Buena                |
|  | 2            | PM <sub>10</sub>  | 11,15      | 10         | Buena                |
|  | 3            | PM <sub>10</sub>  | 17,31      | 16         | Buena                |
| <b>2014</b>                                      | 1            | PM <sub>10</sub>  | 12,86      | 12         | Buena                |
|  | 2            | PM <sub>10</sub>  | 4,78       | 4          | Buena                |
|  | 3            | PM <sub>10</sub>  | 4,31       | 4          | Buena                |
| <b>2015</b>                                      | 1            | PM <sub>10</sub>  | 44,24      | 41         | Buena                |
|  | 2            | PM <sub>10</sub>  | 39,14      | 36         | Buena                |
|  | 3            | PM <sub>10</sub>  | 38,7       | 36         | Buena                |
| <b>2016</b>                                      | 1            | PM <sub>10</sub>  | 30,2       | 28         | Buena                |
|  | 2            | PM <sub>10</sub>  | 47,3       | 44         | Buena                |
|  | 3            | PM <sub>10</sub>  | 30,3       | 28         | Buena                |

*Nota:* Cálculo del ICA considerando únicamente los valores máximos en el análisis estadístico del contaminante PM<sub>10</sub> de los puntos de monitoreo de la estación Castilla II. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

De acuerdo a los resultados del ICA para PM<sub>10</sub> establecidos en la Tabla 20, se determina que en relación al Material particulado, la estación Castilla II presenta en la totalidad de los puntos una calidad del aire “Buena” –color verde-, por lo que según lo establece el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire” no se genera ningún efecto sobre la salud de las personas del área de influencia directa del proyecto.

Luego de analizar todas las estaciones, se evidencia que hay un comportamiento similar de concentraciones de los contaminantes PST y PM<sub>10</sub> en las estaciones Chichimene, Castilla I y Castilla II –ver Figuras 16, 17 y 18-, siendo el año 2015 el que reporta las mayores concentraciones de contaminantes y el año 2014 el que reporta las menores concentraciones de

los contaminantes en mención. La estación Acacias tiene un comportamiento distinto a las demás, como se mencionó en el análisis propio de la estación –ver Figura 15-.

### 8.2.9 Análisis de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> para las estaciones Acacias, Chichimene, Castilla I y Castilla II:

A continuación se presenta la relación del comportamiento temporal de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> para las estaciones Acacias, Chichimene, Castilla I y Castilla II. Se registran 18 datos por punto de monitoreo.

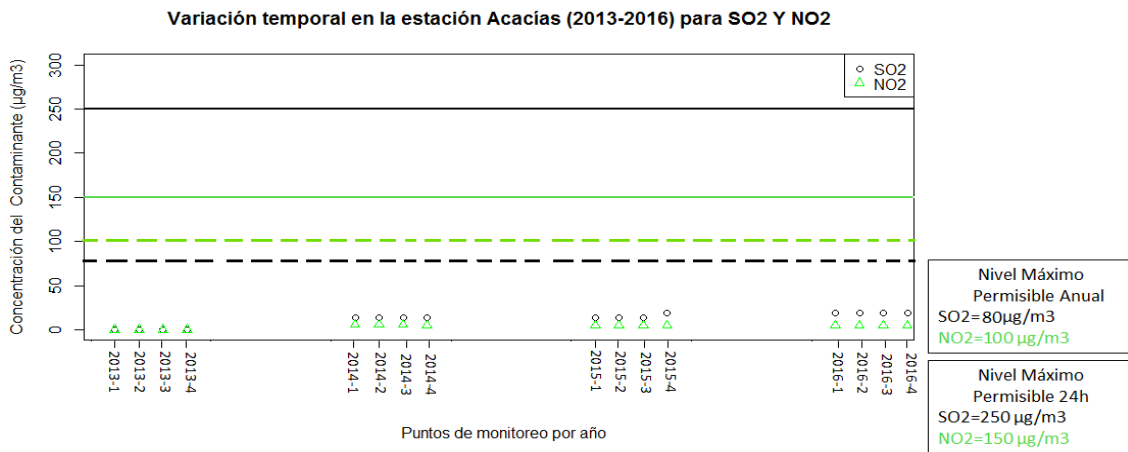


Figura 19: Variación temporal en la estación Acacias durante el periodo 2013 al 2016 para los parámetros NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

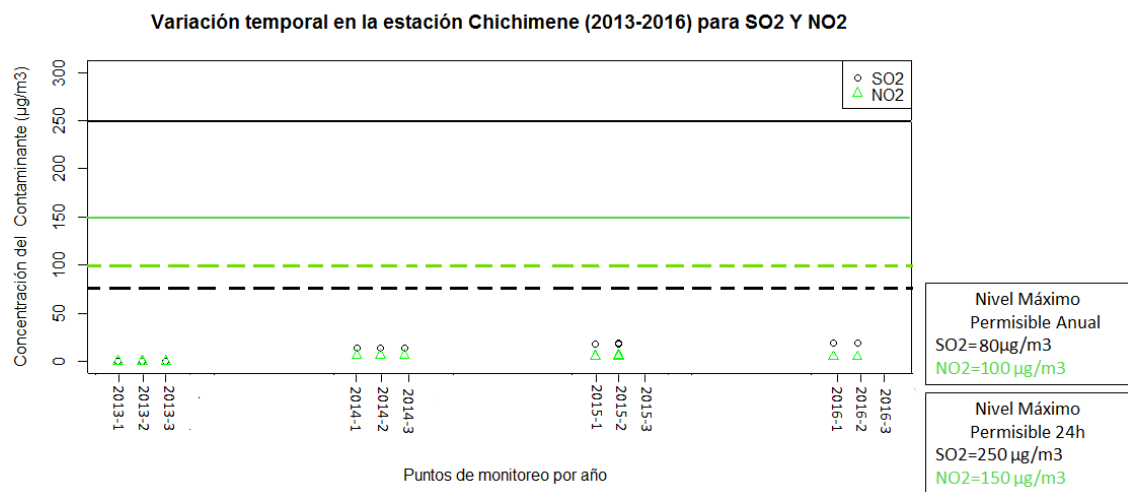


Figura 20: Variación temporal en la estación Chichimene para los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> durante los años 2013 al 2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

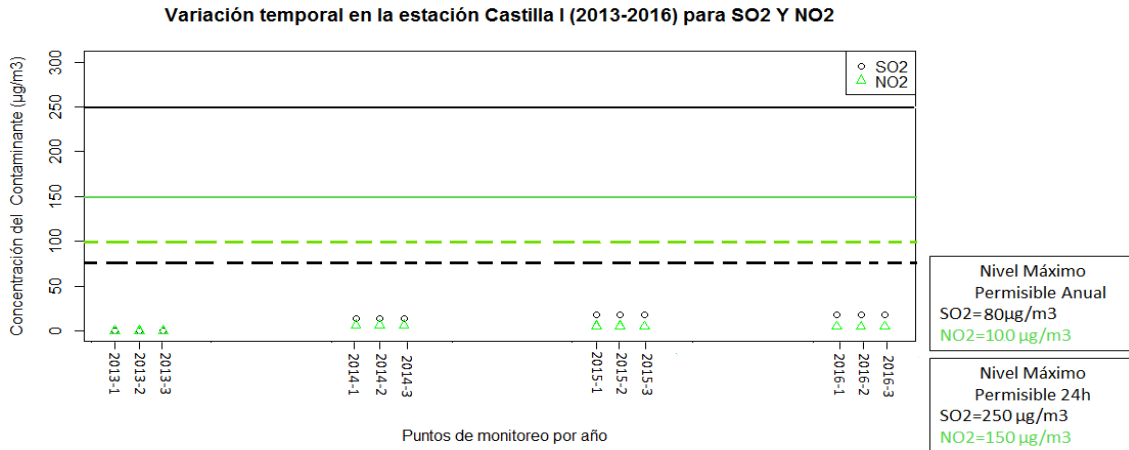


Figura 21: Variación temporal en la estación Castilla I para los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> durante el periodo 2013-2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

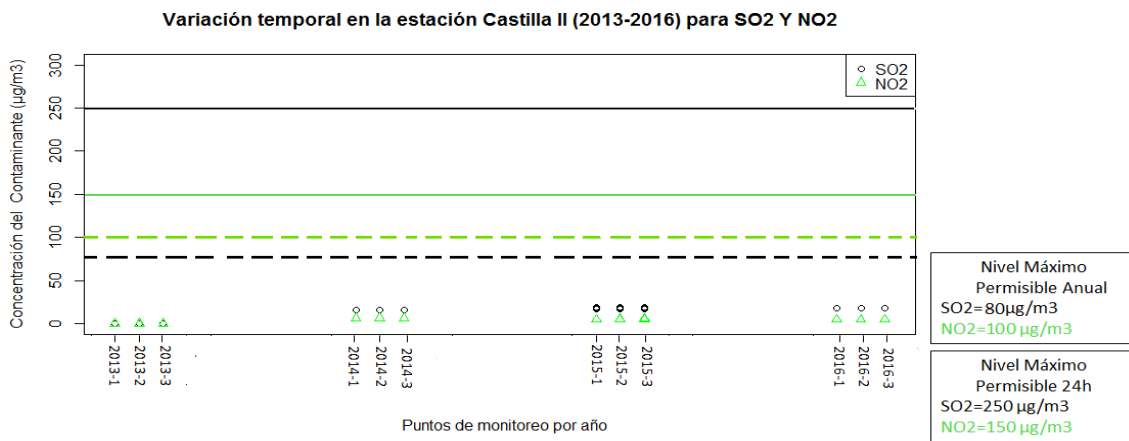


Figura 22: Variación temporal en la estación Castilla II de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> durante el periodo 2013-2016. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

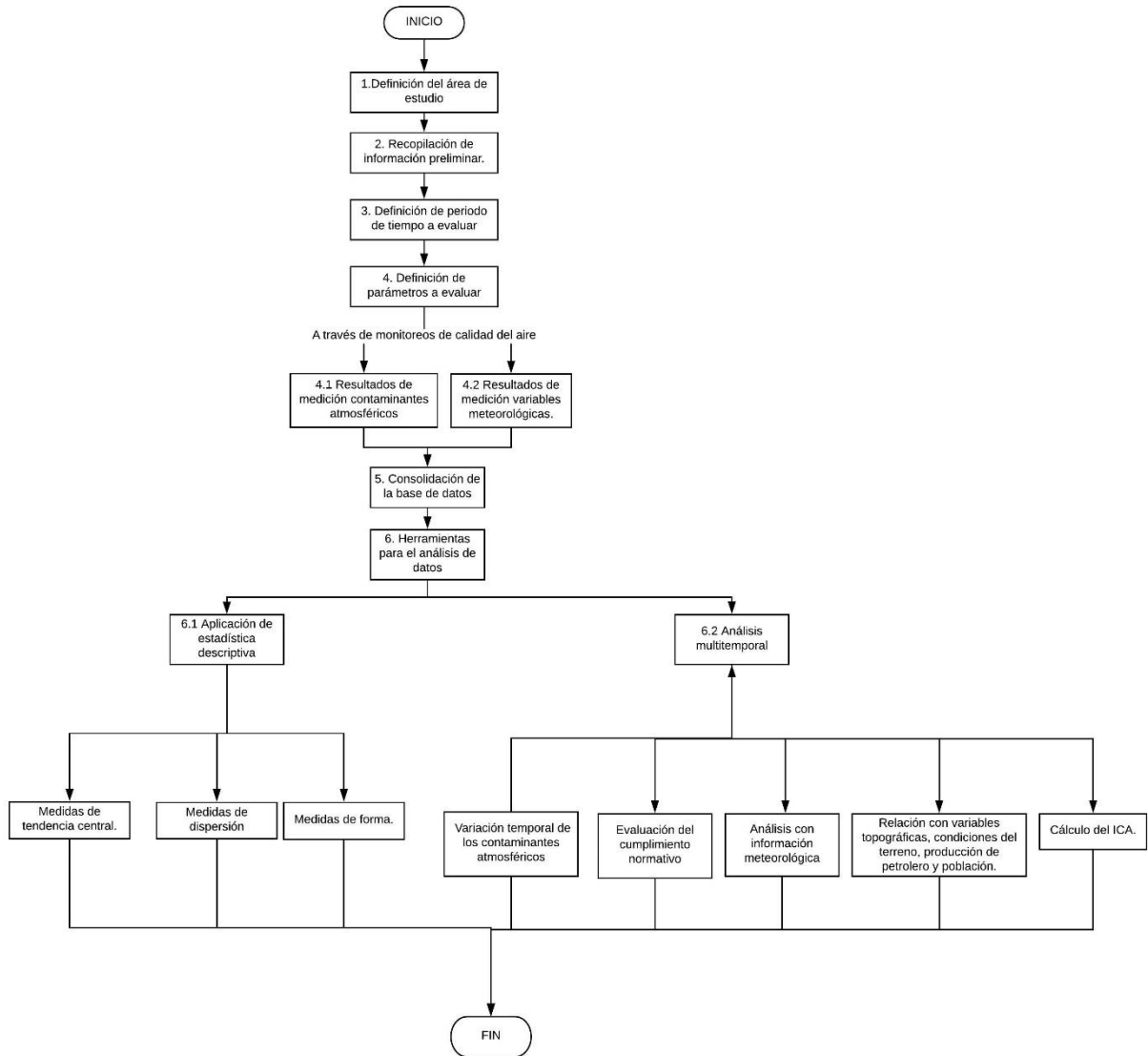
Según los resultados presentados en las Figuras 19, 20, 21 y 22 que representan la variación temporal de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> para las estaciones Acacias, Chichimene, Castilla I y Castilla II del Bloque Cubarral respectivamente, se evidencia que durante los días de monitoreo se registraron bajas concentraciones de estos contaminantes teniendo en cuenta los límites establecidos en la normatividad ambiental vigente y presentaron una concentración menor al límite de cuantificación correspondiente a <18,1 µg/m<sup>3</sup> a condiciones de referencia para SO<sub>2</sub> y <5,2 µg/m<sup>3</sup> para NO<sub>2</sub>, se infiere que en la zona no hay fuentes representativas de estos contaminantes. Al presentar todas las estaciones un comportamiento similar en cuanto a la concentración de los contaminantes NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> y estas ser muy bajas, no se permite realizar un

análisis completo frente a diferentes variables como son meteorológicas, producción de petróleo, topográficas y la población. Al ser contaminantes que en todos sus casos sus datos se encuentran por debajo del límite de cuantificación, no se realiza un análisis estadístico y por lo tanto, tampoco el cálculo del ICA y se considera que estas concentraciones no repercuten significativamente a la calidad del aire de la región.

### **8.3 FASE III: Consolidación de la propuesta metodológica.**

La metodología propuesta se diseñó a partir de la realización del análisis multitemporal de la calidad del aire de las estaciones de Recolección y Tratamiento de crudo del Bloque Cubarral, con la intención de proporcionar a los interesados del sector petrolero herramientas que faciliten el estudio de cambios en la calidad del aire a través del tiempo a partir del análisis multitemporal de los datos, enfocada principalmente a estaciones de recolección y tratamiento de crudo de otros campos de producción petroleros. Además, se tuvieron en cuenta otras variables o actividades que por falta de información no pudo ser aplicado a las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del bloque Cubarral. La presente propuesta también brinda a la empresa, las variables y procedimientos necesarios, de los que se debe tener información, para realizar un estudio de cambios en la calidad del aire completo.

A continuación, en la Figura 23, se muestra la secuencia metodológica propuesta:



*Figura 23:* Flujograma de la propuesta metodológica para el estudio de cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo ubicados en campos de producción petrolera. Por Glenn Lorena Vivas, 2018.

Para la aplicación de la metodología propuesta se deben cumplir los siguientes requisitos mínimos:

### 8.3.1 Definición del área de estudio.

Los interesados en realizar el estudio de cambios en la calidad del aire, a partir de la implementación de la propuesta metodológica, deben tener definido el área de estudio, se aclara que la presente propuesta está dirigida a las estaciones de recolección y tratamiento de crudo ubicados en campos de producción petrolera.

### 8.3.2 Recopilación de información preliminar.

En este ítem se recolecta la información del área de estudio que pueden tener incidencia o influencia en el comportamiento multitemporal de los contaminantes atmosféricos.

Tabla 21. *Descripción de información preliminar a recolectar.*

| INFORMACIÓN       | DESCRIPCIÓN  |
|-------------------|--|
| <b>PRELIMINAR</b> |  |
| Población         | Considerando que esta variable indicaría el estimativo de personas expuestas a la contaminación atmosférica del área de estudio, se debe identificar a la comunidad del área de influencia directa e indirecta del proyecto e incluir su población. Además, teniendo en cuenta que la población más vulnerable a la contaminación atmosférica son los niños y ancianos, el total de esta población debe estar identificada.  |
| Topografía        | Teniendo en cuenta que la topografía afecta directamente al flujo de aire, y por lo tanto tiene influencia en la dispersión de los contaminantes, en este variable se debe reconocer tanto el rasgo topográfico del área de estudio, es decir, si se encuentra en una Cuesta o Valle, en el Mar, Colinas, o si el área de estudio presenta obstrucciones ya sea naturales o antropogénicas, como la altitud y cotas. Además, se debe identificar las condiciones del terreno del área de estudio, si en ésta se encuentra vegetación o vías destapadas que tengan influencia en la calidad del aire. |

Tabla 21. Continuación

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Producción de petróleo.              | En esta variable se debe incluir las actividades propias de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo que pueden generar emisiones de los contaminantes a evaluar, como son quema de gas en teas, incineración de residuos sólidos, transporte de materiales, mantenimiento o construcción de obras, fuentes fijas (calderas, hornos), fuentes móviles, entre otros. Además, se debe incluir el promedio de producción de crudo de cada uno de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, ubicados en los campos de producción petrolera. Teniendo en consideración que a mayores actividades de la industria representa mayor contaminación del aire. |
| Fuentes de contaminación atmosférica | Tomando en consideración que existen diferentes tipos de fuentes de emisión de contaminantes, como son las fuentes fijas, lineales, de área y móviles, se debe identificar, clasificar y cuantificar las mismas, teniendo en cuenta que además de las actividades propias de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, pueden existir otras actividades que aportan a la contaminación del aire en el área de estudio  |
| Características climatológicas       | Recopilar datos del comportamiento de las variables meteorológicas en la zona de estudio durante el periodo a evaluar (dirección y velocidad del viento, temperatura, precipitación, humedad relativa, brillo solar) que tienen incidencia en el comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos.   |

*Nota:* Descripción de la información del área de estudio que pueden tener incidencia o influencia en el comportamiento multitemporal de los contaminantes atmosféricos. Por Glenny Lorena Vivas, 2018.

Es importante destacar que las variables mencionadas anteriormente tienen gran influencia en el comportamiento de los contaminantes atmosféricos. Las condiciones geográficas y climáticas afectan la dispersión de los gases y partículas generadas por las fuentes de contaminación nombradas anteriormente, lo cual determina en última instancia las condiciones atmosféricas de la zona de estudio. Estas sumadas a la topografía del terreno condicionan la concentración final de los contaminantes atmosféricos (Cordero Velarde, 2017). La población, aunque no se tiene en

cuenta en el comportamiento de los contaminantes, sí son las principales expuestas por su generación.

### **8.3.3 Periodo de tiempo a evaluar.**

Debe estar definido el periodo de tiempo a evaluar, se recomienda que la evaluación sea interanual y el periodo mínimo de 2 años de estudio. Además, se debe establecer la frecuencia de medición de los parámetros y el total de monitoreos que se tienen para realizar el estudio. Para el desarrollo del análisis es pertinente que se cuenten con estudios periódicos, que se realicen

### **8.3.4 Determinación de parámetros a evaluar.**

Establecer los contaminantes atmosféricos a evaluar y las variables meteorológicas de las que exista información y se pretenda realizar el análisis. Los contaminantes a evaluar deben estar dentro de los que se consideran contaminantes criterio, es decir, que existen límites máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional.

En el área de estudio debe existir información de monitoreos de calidad del aire que tengan mediciones de los contaminantes atmosféricos a analizar y de variables meteorológicas que tengan incidencia en su comportamiento, estos deben ser realizados en el periodo de tiempo establecido.

En caso de que los informes de calidad del aire no contengan mediciones de variables meteorológicas, se debe solicitar la información al IDEAM proveniente de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio. Para el análisis de la información se recomienda mínimo mediciones de dos variables meteorológicas.

### **8.3.5 Consolidación de la base de datos.**

Consolidar en la base de datos las mediciones de los contaminantes atmosféricos a evaluar en los años y área de estudio establecidos en los monitoreos de calidad del aire. Esta debe ser

realizada de manera estructurada, lo menos redundante posible para su posterior procesamiento. Se recomienda que, en la tabulación de datos, inicialmente se separe por estación (área de estudio), luego por contaminante a analizar, posteriormente los años o el periodo a evaluar y se ingresen los valores de cada punto de monitoreo en estudio. Por su fácil manejo se recomienda el uso de Excel. En la tabla 22 se indica cómo se recopilan los datos, se realiza la aclaración que esta tabla se realizó para dos contaminantes, tres periodos, y dos mediciones por punto de monitoreo, por lo anterior esta tabla puede ser modificada, adecuada a los datos.

Tabla 22. *Estructura de la recopilación en tabla de datos.*

| Área de estudio (estación de recolección y tratamiento de crudo) |                |           |           |                |           |           |
|--|----------------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|
| Punto de monitoreo   | Contaminante 1 |           |           | Contaminante 2 |           |           |
|  | Periodo 1      | Periodo 2 | Periodo 3 | Periodo 1      | Periodo 2 | Periodo 3 |
| 1  |                |           |           |                |           |           |
| 1  |                |           |           |                |           |           |
| 2  |                |           |           |                |           |           |
| 2  |                |           |           |                |           |           |
| 3  |                |           |           |                |           |           |
| 3  |                |           |           |                |           |           |

*Nota:* Estructura para la recopilación de los datos de la concentración de los contaminantes en cada periodo de estudio y por cada punto de monitoreo. Por Glenny Lorena Vivas, 2018

**8.3.6 Análisis estadístico y multitemporal.** En este ítem se deben realizar las siguientes actividades:

#### **8.3.6.1 Análisis estadístico.**

Una vez tabulado los datos de las mediciones de los contaminantes atmosféricos a evaluar, se realiza la aplicación de estadística descriptiva que incluye medidas de tendencia central, medidas de dispersión y medidas de forma, como se relaciona en la Tabla 23. Se recomienda que la aplicación estadística se realice por cada estación y/o pozo de producción, en la Tabla 24 se presenta el formato para consolidar los resultados de la aplicación estadística, se aclara que este



Tabla 24. Continuación

|                                   |           |                |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------|-----------|----------------|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                                   | Periodo 2 |                |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2                                 | Periodo 1 | Contaminante 1 |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   | Periodo 2 |                |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   | Periodo 1 | Contaminante 2 |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                   | Periodo 2 |                |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Cont. Crit: Contaminante criterio |           |                | $\tilde{x}$ = Mediana         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Min= Mínimo                       |           |                | S= Desviación estándar        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Max= Máximo                       |           |                | CV= Coeficiente de variación  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| R= Rango                          |           |                | Ks= Curtosis                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\chi$ =Media                     |           |                | As: Coeficiente de Asimetría. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Cuenta: N° de datos.              |           |                |                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

*Nota:* Formato para consolidación de los resultados de la aplicación estadística, se aclara que este se realizó para dos contaminantes, dos años y dos puntos de monitoreo, por lo que, si el área de estudio presenta más variables, estas deben ser agregadas.

Posterior a su aplicación, se debe interpretar los resultados de la aplicación estadística de la base de datos, analizando año por año el comportamiento de las medidas estadísticas para cada contaminante en estudio. Se recomienda realizar inicialmente el análisis estadístico para que, a partir de sus resultados se compare con la gráfica que representa el comportamiento de la concentración de los contaminantes en estudio durante el periodo a evaluar y se realice el análisis multitemporal del mismo.

### 8.3.6.2 Análisis multitemporal.

Para esta actividad se recomienda el uso del lenguaje de programación R que consiste básicamente en un entorno de programación para el estudio estadístico de datos que presenta subconjuntos de lenguaje desarrollados para áreas específicas del análisis de datos, como la calidad del aire (Follos Pliego, 2012).

A continuación, se muestran algunas de las aplicaciones recomendadas:

#### *8.3.6.2.1 Análisis de la variación temporal de los contaminantes.*

Se recomienda el uso de la función “Gráfica básica de representación de datos en dos ejes” que representa la concentración de los contaminantes evaluados durante el tiempo. A partir de su realización, y junto con los resultados del análisis estadístico se puede identificar y evaluar el comportamiento que han tenido los contaminantes en estudio a través de los años.

#### *8.3.6.2.2 Rosa de contaminantes.*

Con el propósito de relacionar la dirección y velocidad del viento con la concentración de contaminantes para explicar el efecto de posibles fuentes de contaminación local, se propone la rosa de contaminantes pollutionRose que sustituye la velocidad del viento por la concentración de un contaminante determinado para conocer el tiempo que este, y sus distintas concentraciones, se encuentran en una dirección de viento determinada. Para su desarrollo se requiere de la información de las variables dirección y velocidad del viento y las concentraciones de los contaminantes.

#### *8.3.6.2.3 Análisis de tendencias.*

Con el propósito de evaluar la tendencia temporal de la concentración de los contaminantes monitoreados a través de los años, se recomienda la función Smooth Trend, o función de tendencias suavizadas. A partir de ella es posible calcular la tendencia por funciones de suavizado, por cuanto que permitirá, entre otros aspectos, tener una idea general de cómo cambiarían las concentraciones de un contaminante con el tiempo o conocer cómo de significativa es una tendencia observada. Para su desarrollo se utiliza la base de datos consolidada con concentración de contaminantes en el tiempo.

#### *8.3.6.2.4 Identificación de patrones de evolución.*

Para analizar la variación que presentan los contaminantes respecto a distintos periodos temporales, estableciendo patrones de evolución en el comportamiento de dichos contaminantes

en la zona de estudio, se recomienda el uso de la función *timeVariation* que aplicado a la base de datos genera gráficas compuestas con la evolución horaria, diaria, semanal y mensual de los contaminantes evaluados.

#### 8.3.6.2.5 Evaluación del cumplimiento normativo.

Se recomienda el uso de la función *RollingMean*, el cual genera un parámetro que representa los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente. Para los contaminantes criterio, la nueva norma que indica los límites máximos permisibles diario y anual es la Resolución 2254 de 2017, la cual deroga a la Resolución 610 de 2010 y por lo tanto, la evaluación del cumplimiento normativo a partir de este año se debe realizar según lo indicado en la nueva normativa, en la Tabla 25 se relacionan los nuevos niveles máximos permisibles de contaminantes en el aire.

Tabla 25. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios según la Resolución 2254 de 2017

| Contaminante            | Nivel Máximo Permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Tiempo de Exposición |
|-------------------------|--|----------------------|
| <b>PM<sub>10</sub></b>  | 50   | Anual                |
|                         | 100  | 24 horas             |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b> | 25   | Anual                |
|                         | 50   | 24 horas             |
| <b>SO<sub>2</sub></b>   | 50   | 24 horas             |
|                         | 100  | 1 hora               |
| <b>NO<sub>2</sub></b>   | 60   | Anual                |
|                         | 200  | 1 hora               |
| <b>O<sub>3</sub></b>    | 100  | 8 horas              |
|                         | <b>CO</b>  | 5.000                |
|                         | 35.000   | 1 hora               |

*Nota:* La Resolución 610 de 2010 se encuentra derogada por la Resolución 2254 de 2017 desde el 01 de enero de 2018. Sin embargo, el periodo de estudio se encuentra dentro de la vigencia de la Resolución 610 de 2010, por lo que se tiene en cuenta esta normativa para la evaluación del cumplimiento de los límites máximos permisibles. Adaptado de Resolución 2254 de 2017 (Resolución 2254 de 2017, 2017).

#### *8.3.6.2.6 Análisis con información meteorológica.*

A partir de la realización de climogramas, se pretende relacionar variables meteorológicas como precipitación y temperatura (máxima, media y mínima) en las fechas y puntos de monitoreo establecidos para el área de estudio.

#### *8.3.6.2.7 Relación con variables topográficas, condiciones del terreno, producción de petróleo y población.*

En este apartado se debe identificar la influencia que tienen las variables recopiladas en la información preliminar con la concentración y dispersión de los contaminantes atmosféricos a evaluar. En relación con la topografía y las condiciones del terreno se debe considerar que un terreno montañoso puede afectar la dispersión de los contaminantes, mientras que áreas destapadas pueden generar emisión de partículas. En relación con la producción de petróleo, a mayores actividades en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, mayor emisión de contaminantes que tienen incidencia en su concentración. Lo que corresponde a la población, se debe relacionar el estimativo de personas afectadas y su vulnerabilidad.

#### *8.3.6.2.8 Cálculo del ICA.*

Teniendo en cuenta los contaminantes de estudio, se debe realizar el cálculo del Índice de Calidad del Aire para comparar los niveles de contaminación de calidad del aire entre los diferentes puntos de monitoreo de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, que además permite establecer su relación con los efectos a la salud. Según lo establece el artículo 20 de la resolución 2254 de 2017 se presentan los nuevos puntos de corte del ICA que están vigentes desde el 01 de enero de 2018, y están relacionados en la Tabla 26:

Tabla 26. *Puntos de corte del ICA según Resolución 2254 de 2017.*

| Índice de Calidad del Aire |          |                                       | Puntos de corte del ICA         |                                  |               |                           |                           |                              |                          |
|----------------------------|----------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|
| ICA                        | Color    | Categoría                             | PM <sub>10</sub><br>24<br>horas | PM <sub>2,5</sub><br>24<br>horas | CO<br>8 horas | SO <sub>2</sub><br>1 hora | NO <sub>2</sub><br>1 hora | O <sub>3</sub><br>8<br>horas | O <sub>3</sub><br>1 hora |
| 0-50                       | Verde    | Buena                                 | 0 – 54                          | 0 - 12                           | 0 – 5094      | 0 - 93                    | 0 - 100                   | 0 - 106                      | -                        |
| 51-100                     | Amarillo | Aceptable                             | 55 – 154                        | 13 - 37                          | 5095 – 10819  | 94 - 197                  | 101 - 189                 | 107 - 138                    | -                        |
| 101-150                    | Naranja  | Dañina a la salud de Grupos Sensibles | 155 - 254                       | 38 - 55                          | 10820 - 14254 | 198 - 486                 | 190 - 677                 | 139 - 167                    | 245 - 323                |
| 151-200                    | Rojo     | Dañina a la salud                     | 255-354                         | 56 - 150                         | 14255 – 17688 | 487 - 797                 | 678 - 1221                | 168 - 207                    | 324 - 401                |
| 201-300                    | Purpura  | Muy dañina a la salud                 | 355-424                         | 151 - 250                        | 17689 – 34862 | 798 - 1583                | 1222 - 2349               | 208 - 393                    | 402 - 794                |
| 301-500                    | Marrón   | Peligrosa                             | 425 - 604                       | 251 - 500                        | 34863 – 57703 | 1584 - 2629               | 2350 - 3853               | 394                          | 795 - 1185               |

*Nota:* Nuevos puntos de corte del ICA vigentes desde el 01 de enero de 2018. Adaptado de Resolución 2254 de 2017 (Resolución 2254 de 2017, 2017)

Se aclara que el cálculo del ICA que se realiza en el presente proyecto se estableció de acuerdo a lo requerido en el Manual de Operaciones de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, ya que el tiempo de evaluación estaba dentro de la vigencia de este manual.

A partir de la realización de las actividades anteriores se consolida los resultados de la información obtenida del análisis estadístico y multitemporal, en un documento final

## Conclusiones

1. Según los datos obtenidos en el análisis estadístico y multitemporal de la información se determinó que en el año 2015 se presentó las concentraciones de los contaminantes PST y PM<sub>10</sub> más altas y en el año 2014 las concentraciones más bajas de los contaminantes evaluados durante el periodo de estudio en las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Castilla I, Castilla II y Chichimene, exceptuando únicamente la estación Acacías.
2. De acuerdo con la información preliminar del Bloque Cubarral, se identifica que la mayor producción de petróleo de los campos Castilla y Chichimene se reportó en el año 2015, por lo que se estima que esta variable influyó en el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos evaluados en el periodo de estudio.
3. Los datos de producción de petróleo identificados en la información preliminar del Bloque Cubarral determinan que la mayor producción de crudo proviene del Campo Castilla que incluye a las estaciones de recolección y tratamiento de crudo Acacías, Castilla I y Castilla II ubicadas en jurisdicción del municipio de Castilla, por lo que esta sería la población más afectada del Bloque, con una cantidad de casi 10.000 habitantes al 2016.
4. Los valores máximos reportados para los parámetros PST y PM<sub>10</sub> para todas las estaciones, se presentaron durante días secos, por lo que es posible corroborar que estas condiciones climatológicas tienen incidencia en la alta concentración de los contaminantes atmosféricos.
5. Respecto a los parámetros analizados en el estudio de calidad del aire realizado en cada una de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo, se observó que los parámetros de mayor incidencia son el PST, seguido del PM<sub>10</sub>, debido a que las partículas se

encuentran en la zona como consecuencia de las actividades realizadas cotidianamente (circulación de vehículos en vías destapadas, quema de desechos industriales, quema de gas en tea que puede generar material particulado).

6. El cálculo del ICA para el contaminante  $PM_{10}$  determinó que, en general, todas las estaciones de recolección y tratamiento de crudo presentan una calidad del aire con clasificación “Buena”.

7. La propuesta metodológica permitirá a la empresa identificar las variables que, por falta de información, no pudieron ser relacionadas en el comportamiento de la concentración de los contaminantes de las estaciones de recolección y tratamiento de crudo del Bloque Cubarral y que llevan a complementar el análisis de la calidad del aire.

8. La propuesta metodológica permitirá que los interesados en estudiar los cambios en la calidad del aire en estaciones de recolección y tratamiento de crudo de otros campos de producción petrolera, realicen, a partir de una serie de actividades, el análisis del comportamiento de la concentración de los contaminantes atmosféricos a evaluar, identificando la incidencia de variables meteorológicas y actividades propias de la industria en el comportamiento de los mismos.

### **Recomendaciones y discusión**

1. Se recomienda seguimiento continuo al contaminante que presente mayor concentración para indagar las causas y así proceder a realizar acciones correctivas. Posteriormente realizar planes de acción y alternativas para el mejoramiento de la calidad del aire.

2. Se recomienda implementar sistemas de control para la reducción de material particulado, la pavimentación de vías y el mantenimiento periódico removiendo la acumulación de partículas, el control de tránsito de vehículos, la medición constante de emisiones fugitivas en los equipos, lo que permita conseguir una reducción significativa de la contaminación atmosférica y mejorar las condiciones ambientales del área donde se realizan las actividades petroleras.

3. Se recomienda instalar una estación de monitoreo de calidad del aire para el registro de la información de forma continua que permita verificar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos durante el año, considerando variables meteorológicas y otros factores como la producción petrolera que pueden afectar la concentración de los contaminantes atmosféricos.

4. Se recomienda seguir realizando este tipo de estudios, actualizando la información de actividades industriales que puedan generar emisiones contaminantes considerables en el sector, lo que permita evaluar la calidad del aire identificando posibles afectaciones a la comunidad del Bloque Cubarral.

**Referencias Bibliográficas.**

- Albizuri, A. (s.f.). Análisis de tendencias de la calidad del aire en la C.A.P.V. *Trabajo de grado*. Obtenido de [http://www.euskadi.eus/contenidos/evento/contaminacion\\_atmosferica/eu\\_jornada/adjuntos/2-7.pdf](http://www.euskadi.eus/contenidos/evento/contaminacion_atmosferica/eu_jornada/adjuntos/2-7.pdf)
- Alvis Camacho, E. D. (2010). Impacto ambiental generado por el material particulado, sobre la calidad del aire en la zona de influencia de los proyectos carbonífero del departamento del Cesar. *Trabajo de grado*. Obtenido de Trabajo de grado: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/19468/AlvisCamachoElianDavid2012.pdf?sequence=1>
- ANH. (2017). *Estadísticas de producción de petróleo en Colombia*. Obtenido de <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>
- Antek. (2015). *Monitoreo de calidad del aire VRO Estación Acacías 2015*. Villavicencio.
- Antek. (2016). *Informe de interpretación de resultados INF-3628-15-ECO*. Villavicencio.
- Antek s.a. (2013). *Monitoreo de calidad del aire 2013*. Villavicencio.
- Antek S.A. (2015). *Monitoreo de calidad del aire Castilla I 2015*. Villavicencio.
- Arias, S. P., & Daza, C. E. (2009). Propuesta metodológica para correlacionar la calidad del aire y las enfermedades respiratorias en un municipio intermedio colombiano: Caso de Tuluá - Valle del Cauca. *Trabajo de grado*. Santiago de Cali. Obtenido de [http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/871/1/Propuesta\\_Enfermedades\\_Cauca\\_Arias\\_2009.pdf](http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/871/1/Propuesta_Enfermedades_Cauca_Arias_2009.pdf)
- Barrientos, J. (2015). *Procesos de Flujo*. Obtenido de <http://www.carec.com.pe/biblioteca/biblio/6/45/15.%20Cap12.%20Procesos%20de%20Flujo.pdf>

- Briceño Castillo, J., Herrera Murillo, J., Solorzano Arias, D., Beita Guerrero, V. H., & Rojas Marin, J. F. (2016). *Sexto informe de Calidad del Aire para el Área Metropolitana de Costa Rica 2013-2015*. Obtenido de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/noticias/noticias-2016/938-vi-informe-de-calidad-del-aire-de-la-gam-2013-2015>
- Cancino, J. (2006). Validación y análisis de la información de la red de calidad del aire de Bogotá. *Trabajo de grado*. Obtenido de <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/validacion-y-analisis-de-la-informacion-de-la-red-de-calidad-del-aire-de-bogota>
- Cárdenas, M. (2013). *Guía ambiental para el desarrollo de campos petroleros*. Obtenido de <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guia-ambiental-para-el-desarrollo-de-campos-petroleros.pdf>
- Carshaw, D. (28 de Enero de 2015). *The openair manual open-source tools for analysing air pollution data*. Obtenido de [http://www.openair-project.org/PDF/OpenAir\\_Manual.pdf](http://www.openair-project.org/PDF/OpenAir_Manual.pdf)
- Constitución Política de Colombia. (07 de Julio de 1991). Recuperado el 03 de Marzo de 2018, de <http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion%20politica%20de%20Colombia.pdf>
- Cordero Velarde, J. (2017). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud de la población del distrito N°3 Vinto - Oruro. *RevActaNova. vol.8 no.3 Cochabamba mar. 201*. Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1683-07892018000100002](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892018000100002)
- Cortés Araújo, J. (2013). Evaluación de la contaminación atmosférica en el aire ambiente de manizales por COPs y PM10. *Trabajo de grado*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/12171/1/4101005.2013.pdf>

- DANE. (2008). *Estimación y proyección de población nacional*. Recuperado el 2016, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- DANE. (s.f.). *Sistema de consulta*. Recuperado el 18 de Marzo de 2018, de <http://www.dane.gov.co/index.php/sistema-estadistico-nacional-sen/planificacion-estadistica/sistema-de-consulta>
- Decreto 02 de 1982. (1982). Presidencia de la Republica. Recuperado el 03 de Marzo de 2018, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=21973>
- Decreto 2041 del 2014. (15 de Octubre de 2014). Presidencia de la Republica. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/34-DECRETO%202041%20DEL%2015%20DE%20OCTUBRE%20DE%202014.pdf>
- Decreto 948 de 1995. (1995). Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado el 03 de Marzo de 2018, de [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec\\_0948\\_1995.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf)
- Decreto 979 de 2006. (2006). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Recuperado el 03 de Marzo de 2018, de <http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Normatividad/Decreto%20979%20abril%20de%202006.pdf>
- Diaz Florez, L., & Galindo Hurtado, J. (2015). Efectividad de las políticas ambientales para controlar la contaminación del aire en Bogotá. *Trabajo de grado*. Obtenido de [http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18151/10101018\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18151/10101018_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Diaz Jimenez, J., & Linares Gil, C. (2010). *Contaminación atmosférica y salud*. Obtenido de [http://ecodes.org/component/option,com\\_phocadownload/Itemid,446/id,22/view/category/](http://ecodes.org/component/option,com_phocadownload/Itemid,446/id,22/view/category/)
- ECODES. (26 de Abril de 2010). *Las causas de la contaminación atmosférica y los contaminantes atmosféricos más importantes*. Recuperado el 30 de abril de 2018, de

<http://ecodes.org/salud-calidad-aire/201302176118/Las-causas-de-la-contaminacion-atmosferica-y-los-contaminantes-atmosfericos-mas-importantes>

Ecopetrol . (16 de Septiembre de 2014). *Portal Ecopetrol* . Obtenido de [http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/?urile=wcm%3Apath%3A/Ecopetrol\\_ES/Ecopetrol/nuestra-empresa/Quienes-Somos/acerca-de-nosotros/Marco-Legal](http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/?urile=wcm%3Apath%3A/Ecopetrol_ES/Ecopetrol/nuestra-empresa/Quienes-Somos/acerca-de-nosotros/Marco-Legal)

Ecopetrol. (16 de Septiembre de 2014). *Marco Estratégico Ecopetrol*. Obtenido de <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/marco-estrategico/mision-vision>

Ecopetrol S.A. . (2012). *Plan de Manejo Ambiental Campo Castilla - Chichimene*. Villavicencio.

Ecopetrol S.A. . (2015). *Modificación del Plan de Manejo Ambiental Bloque Cubarral Campos Castilla y Chichimene*. Villavicencio.

Ecopetrol S.A. (2015). *Modificación del Plan de Manejo Ambiental Bloque Cubarral Campos Castilla y Chichimene*. Villavicencio.

EPAM S.A. (2010). *Informe técnico aeropuerto Guillermo León Valencia de Popayan*. Obtenido de [ftp://ftp.ani.gov.co/Aeropuertos/Sur%20Occidente/T%C3%A9cnico/5.%20INVERSIONES/5.g\)%20MEDIO%20AMBIENTE/POPAYAN/ICA/ICA%202011/Anexos/FMA-002/Anexo%207.%20Monitoreo%20de%20Calidad%20del%20Aire.pdf](ftp://ftp.ani.gov.co/Aeropuertos/Sur%20Occidente/T%C3%A9cnico/5.%20INVERSIONES/5.g)%20MEDIO%20AMBIENTE/POPAYAN/ICA/ICA%202011/Anexos/FMA-002/Anexo%207.%20Monitoreo%20de%20Calidad%20del%20Aire.pdf)

Follos Pliego, F. (2012). *Lenguaje R aplicado al análisis de datos de calidad del aire*. Obtenido de [http://www.openair-project.org/PDF/R\\_Openair\\_aplicado\\_a\\_calidad\\_del\\_aire.pdf](http://www.openair-project.org/PDF/R_Openair_aplicado_a_calidad_del_aire.pdf)

García Ávila, P. A. (2013). Implementación del software estadístico Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad del aire de Bogotá. *Trabajo de grado*. Obtenido de Trabajo de grado: <http://www.bdigital.unal.edu.co/39469/1/pedroalejandrogarciaavila.2013.pdf>

Gonzalez Velandia, T. F. (Mayo de 2015). Determinación de la calidad del aire en la Universidad Libre seccional Bogotá sede Bosque Popular. *Trabajo de grado* . Obtenido de

<http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7951/Proyecto%20Calidad%20del%20Aire%20U%20Libre%20%281%29%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Herrera, J., & Rodríguez, S. (2007). *Cuarto Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José*. Obtenido de

<http://www.edeca.una.ac.cr/laa/files/Productos/Documentos/CUARTO%20INFORME%20DE%20CALIDAD%20DEL%20AIRE%20DESAN%20JOSE.pdf>

Ideam. (2015). *Programa de fisicoquímica atmosférica*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/41590/42475/Propuesta+fisico.pdf/aa12e6b8-0ee9-4aaf-88c7-d7d950fd901c>

IDEAM. (2016). Documento Metodológico - Estadísticas de Monitoreo y Documento Metodológico - Estadísticas de Monitoreo y. Bogotá D.C.: instituto de meteorología, hidrología y estudios ambientales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72064938/M-GCI-EA-M008+DOCUMENTO+METODOL%C3%93GICO+ESTAD%C3%8DSTICAS+EMSRUAM.pdf/c05e67bc-60d8-4692-8562-b5cd54780a5c>

IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015*. Obtenido de <http://www.andi.com.co/Ambiental/SiteAssets/1%20Informe%20del%20estado%20de%20la%20calidad%20del%20aIRE%20EN%20cOLOMBIA.pdf>

Ideam. (14 de Diciembre de 2017). *Documento metodológico de estadística de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72064938/M-GCI-EA-M008+DOCUMENTO+METODOL%C3%93GICO+ESTAD%C3%8DSTICAS+EMSRUAM.pdf/c05e67bc-60d8-4692-8562-b5cd54780a5c>

Instituto de Epidemiología y salud comunitaria. (2004). *Impacto de la actividad petrolera en la salud de poblaciones rurales de la amazonía ecuatoriana*. Obtenido de <https://repository.unm.edu/bitstream/handle/1928/11778/Informe%20Yana%20curi.pdf?sequence=1>.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2016). *Análisis de tendencias y estado actual de la calidad del aire en Salamanca, Guanajuato*. Obtenido de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/2016\\_CGCSA\\_Reporte\\_Calidad\\_del\\_aire.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/2016_CGCSA_Reporte_Calidad_del_aire.pdf)
- Jiménez Muñoz, X. A. (junio de 2011). *Caracterización de la calidad del aire en el sector industrial y propuesta de herramientas de medida*. Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13660/jimenez-xiomara-tfm.pdf>
- Kent, A., & Carslaw, D. (21 de Enero de 2009). *Analysis of air pollution in North Lincolnshire*. Obtenido de [http://www.nlincsair.info/Files/Reports/128090223\\_NorthLincs\\_R\\_Project\\_Report.pdf](http://www.nlincsair.info/Files/Reports/128090223_NorthLincs_R_Project_Report.pdf)
- MAPAMA. (26 de Abril de 2018). *MAPAMA*. Recuperado el 30 de abril de 2018, de <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/>
- Marciniak, R. (2017). Propuesta metodológica para el diseño del proyecto del curso virtual: aplicación piloto. *Scielo*, Volumen 9, número 2, pp 74.95.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Diciembre de 2012). *Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental*. Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial . (2010). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas\\_de\\_la\\_Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica\\_de\\_Preveni%C3%B3n\\_y\\_Control\\_de\\_la\\_Contaminaci%C3%B3n\\_del\\_Aire.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica_de_Preveni%C3%B3n_y_Control_de_la_Contaminaci%C3%B3n_del_Aire.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Manual de Operaciones de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire*. Recuperado el 28 de Febrero de 2018, de [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion\\_atmosferica/Protocolo\\_Calidad\\_del\\_Aire\\_-\\_Manual\\_Operaci%C3%B3n.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Operaci%C3%B3n.pdf)

- MINTIC. (2016). *Datos abiertos. Gobierno Digital Colombia*. Obtenido de <https://www.datos.gov.co/browse?category=Ambiente+y+Desarrollo+Sostenible&q=Instituto%20de%20Hidrolog%C3%ADa%2C%20Meteorolog%C3%ADa%20y%20Estudios%20Ambientales&sortBy=relevance&utf8=%E2%9C%93>
- Mitchel, T. (2011). *Annual air quality monitoring report for the Wellington region*. Obtenido de <http://www.gw.govt.nz/assets/council-publications/Annual-air-quality-monitoring-report-for-the-Wellington-region-2011.pdf>
- Montero López, C. (2011). Pronóstico de la calidad del aire en el área metropolitana de la ciudad de México a través del análisis de las series de tiempo de los componentes del IMECA. *Trabajo de grado*. Obtenido de <http://www.bib.uia.mx/tesis/pdf/015419/015419.pdf>
- Morales, N., & Nobles, M. (2013). Lineamientos para la formulación del plan de gestión de la calidad del aire en la ciudad de Montería. *Trabajo de grado*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13513/MoralesNaira2013.pdf;jsessionid=1590695E8DAA53CB09EC99463866BF59?sequence=1>
- OCA. (2016). *Hidrocarburos - Bloque Cubarral ECOPETROL - JAC Veredas Esmeralda y Chichimene*. Recuperado el 01 de mayo de 2018, de [https://conflictos-ambientales.net/oca\\_bd/env\\_problems/view/21](https://conflictos-ambientales.net/oca_bd/env_problems/view/21)
- OCA. (25 de Septiembre de 2017). *Petróleo en el Meta: una radiografía de la desconfianza*. Obtenido de <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/explotacion-de-petroleo-en-meta-cause-desconfianza-en-las-comunidades/38693>
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)
- Posada Hernández, G. J. (2016). *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Obtenido de <file:///C:/Users/Home/Documents/proyecto%20de%20grado/elementos%20b%C3%A1sicos>

os%20de%20estad%20C3%ADstica%20descriptiva%20para%20el%20an%20C3%A1lisis%20de%20datos.pdf

Posada Hernández, G. J. (2016). *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Recuperado el 02 de Abril de 2018, de [http://www.funlam.edu.co/uploads/fondoeditorial/120\\_Ebook-elementos\\_basicos.pdf](http://www.funlam.edu.co/uploads/fondoeditorial/120_Ebook-elementos_basicos.pdf)

Presidencia de la República. (1974). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Recuperado el 03 de Marzo de 2018, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1551>

Resolución 0293 de 2016. (2016). ANLA. Obtenido de [http://www.anla.gov.co/sites/default/files/res\\_0293\\_18032016.pdf](http://www.anla.gov.co/sites/default/files/res_0293_18032016.pdf)

Resolución 2154 de 2010. (02 de noviembre de 2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Recuperado el 03 de marzo de 2018, de Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/79-Resoluci%C3%B3n%202154%20de%202010%20-%20Ajuste%20Protocolo%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Resolución 2254 de 2017. (01 de Noviembre de 2017). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res%202254%20de%202017.pdf>

Resolución 2254 de 2017. (01 de noviembre de 2017). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Obtenido de <http://www.safetyworkla.com/new/imagenes/sueltas/resolucion-2254-de-2017-calidad-del-aire.pdf>

Resolución 610 de 2010. (24 de marzo de 2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Recuperado el 03 de marzo de 2018, de <http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Normatividad/Resoluci%C3%B3n%20610%20marzo%202010.pdf>

- Resolución 610 de 2010. (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- Romero Placeres, M. (2006). *La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud*. Obtenido de [http://www.bvs.sld.cu/revistas/hie/vol44\\_2\\_06/hie08206.htm](http://www.bvs.sld.cu/revistas/hie/vol44_2_06/hie08206.htm)
- Secretaria de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable México. (2011). *Programa para la mejora de la Calidad del Aire Jalisco 2011-2020*. Jalisco, México. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>
- Seinfeld, J. H. (2013). *Contaminación atmosférica: Fundamentos físicos y químicos*. Madrid: Edición española.
- Sniffer. (Diciembre de 2010). *PM 2.5 in the UK*. Obtenido de <http://www.aqconsultants.co.uk/AQC/media/Reports/SNIFFER-PM25-Rept-Final-201210.pdf>
- Tyler, N., Acevedo Bohorquez, J., Bocarejo Suescún, J., & Velásquez, J. M. (Abril de 2013). Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia. *Trabajo de grado*. Obtenido de <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia.pdf>
- UNFCCC. (07 de Diciembre de 2017). *El mundo se compromete a acabar con la contaminación en cumbre ambiental de la ONU*. Obtenido de <https://unfccc.int/es/news/el-mundo-se-compromete-a-acabar-con-la-contaminacion-en-cumbre-ambiental-de-la-onu>
- Universidad de Antioquia. (2007). *Estado del Arte sobre los estudios de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá*. Obtenido de <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpcccontent/Sites/Subportal%20del%20Ciudadano/Salud/Secciones/Publicaciones/Documentos/2012/Investigaciones/Contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20y%20efectos%20sobre%20la%20salud%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.pdf>

Universidad Nacional. (2016). *Análisis de tendencias y estado actual de la calidad del aire en Salamanca, Guanajuato.* Obtenido de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/2016\\_CGCSA\\_Reporte\\_Calidad\\_del\\_aire.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/2016_CGCSA_Reporte_Calidad_del_aire.pdf)