



**Análisis preliminar de las cuencas atmosféricas como herramienta de ordenamiento territorial
a partir de Puente Aranda, Bogotá, Colombia**

**María Camila Polania Ayala
Sandra Patricia Sarmiento Granados**

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, 5 de noviembre de 2019

Análisis preliminar de las cuencas atmosféricas como herramienta de ordenamiento territorial a partir de Puente Aranda, Bogotá, Colombia

María Camila Polania Ayala
Sandra Patricia Sarmiento Granados

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):
José Alfonso Avellaneda Cusaria

Línea de Investigación:
Salud Ambiental

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por la oportunidad que me brindo para sacar mi carrera adelante, por acompañarme todos los días y darme siempre las fuerzas para seguir adelante.

A mis padres y a mi familia por el sacrificio que tuvieron al darme la oportunidad de hacer esta carrera y de colaborarme en todo lo que necesité.

A nuestro director José Alfonso Avellaneda por colaborarnos tanto, porque sin el este proyecto no habría sido posible y el nos inspiró a hacer y sacar adelante este proyecto en todo momento.

Igualmente quiero agradecer a Daniela Camelo porque gracias a su disposición comprendimos temas que estábamos necesitando y aprendimos como darle avances claves al proyecto.

Finalmente quiero agradecer a mi compañera Sandra por toda la paciencia que tuvo conmigo en este proyecto y durante toda la carrera, ella fue un apoyo muy importante para llegar a este punto.

María Camila Polania Ayala

A Dios por brindarme la oportunidad de cursar la carrera con éxito, por todos los momentos en que fue fuente de fortaleza y por brindarme la posibilidad de vivir tantas experiencias.

A mis abuelos, mi madre, mi tía y el resto de la familia por ser inspiración y apoyo incondicional en el camino. Por brindarme la oportunidad de culminar la carrera y estar siempre presentes.

A nuestro director José Alfonso Avellaneda por brindarnos las herramientas necesarias para sacar el proyecto adelante, por ser inspiración, fuente de sabiduría y darnos siempre palabras optimistas que demostraban su compromiso para darle vida al proyecto.

Agradezco a la ingeniera Daniela Camelo por su disposición para aclarar nuestras dudas con respecto al tema con mucha paciencia y por darnos guía a la hora de ejecutar algunas tareas.

Finalmente me gustaría agradecer a mi compañera Camila porque sin ella no habría sido posible, por su dedicación, entrega y buena energía. Gracias porque juntas logramos cumplir esta meta.

Sandra Patricia Sarmiento Granados

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan su agradecimiento a:

Nuestro director José Alfonso Avellaneda Cusaria por su especial dedicación, compromiso, apoyo, enseñanzas y motivación a lo largo del desarrollo del proyecto.

Nuestro tutor Dr. Ernesto Caetano, por sus respuestas precisas y por compartir su valioso conocimiento con nosotras por medio de asesorías, las cuales se desarrollaron a pesar del corto tiempo y la distancia. Por cada uno de sus aportes y por permitirnos conocer más a fondo del tema.

Nuestro codirector David Beltrán ya que con sus observaciones logramos darle un mejor enfoque a nuestro proyecto de modo que fuese más preciso. Por brindarnos apoyo con sus conocimientos y por su tiempo dedicado al desarrollo de nuestro trabajo.

La Universidad El Bosque por permitirnos encontrar en su programa todas las herramientas apropiadas que nos permitieron formarnos como las ingenieras que ahora somos. Por darnos la posibilidad de conocer y vivir experiencias de conocimiento en las aulas y fuera de ellas, gracias a lo cual nos formamos como profesionales integrales y con ganas de ejercer nuestra profesión de la mejor manera que sea posible.

Nuestros amigos, con quienes compartimos nuestras vivencias, por su apoyo e incondicionalidad. También a todas y cada una de las personas que de alguna u otra manera nos brindaron aportes positivos en estos últimos años.

A todos ellos un infinito agradecimiento.

Tabla de Contenidos

1. Resumen	1
2. Abstract	1
3. Introducción	2
4. Planteamiento del problema	3
5. Pregunta de investigación	4
6. Justificación	5
7. Objetivos	5
7.1 Objetivo General	5
7.2 Objetivos Específicos	6
8. Marco de referencia	6
8.1 Marco de referencia biogeográfico y descripción del territorio	6
8.2 Marco teórico - conceptual.....	8
8.2.1 Descripción de variables meteorológicas y climatológicas	12
8.3 Antecedentes (estado del arte).....	20
8.3.1 Cuencas Atmosféricas.....	22
8.3.2 Modelo HYSPLIT	23
8.3.3 Modelos Meteorológicos-Planificación Ambiental	24
8.3.4 Variables Ambientales-Planificación Territorial	25
8.4 Marco de referencia normativo	26
8.5 Marco institucional.....	27
9. Metodología	28
9.1 Metodología de la investigación y diseño metodológico	28
9.1.1 Enfoque y alcance de la investigación	28
9.1.2 Hipótesis de investigación	28
9.1.3 Hipótesis nula.....	28
9.1.4 Hipótesis alternativa.....	29
9.1.5 Unidad de análisis	29
9.1.6 Muestra y población (cuantitativo)	29
9.1.7 Variables, aspectos e indicadores.....	30
9.2 Metodología por objetivos.....	31
9.2.1 Objetivo 1. Analizar las características meteorológicas y climáticas presentes en la Ciudad de Bogotá, Colombia en el Sector de Puente Aranda.....	31

9.2.2	Objetivo 2. Conocer de manera preliminar las cuencas atmosféricas del Sector de Puente Aranda (Bogotá, Colombia) y las localidades en la periferia, mediante la modelación (HYSPLIT) del comportamiento de las masas de aire.....	32
9.2.3	Objetivo 3. Proponer estrategias de planificación para el ordenamiento territorial con base en el modelamiento de la cuenca atmosférica a partir de Puente Aranda.....	32
9.3	Plan de trabajo.....	33
	10. Resultados y análisis	35
10.1	Reconocimiento de la zona de estudio y el territorio	35
10.2	Comportamiento meteorológico y climatológico en Puente Aranda.....	36
10.2.1	Precipitación.....	37
10.2.2	Temperatura	38
10.2.3	Humedad relativa	38
10.2.4	Vientos	42
10.2.5	Viento bajo (10 m)	44
10.2.6	Rosas de Vientos de Puente Aranda	45
10.3	Relación de todas las variables metodológicas.....	47
10.4	Capa límite y dinámica de la contaminación atmosférica	50
10.5	Contaminantes atmosféricos.....	51
10.5.1	Material particulado (PM ₁₀).....	51
10.5.2	Dióxido de azufre SO ₂	53
10.5.3	Óxidos de nitrógeno NO _x	55
10.6	Comparación con la norma.....	58
10.7	Colombia meteorología 1985-2018	64
10.7.1	Precipitación.....	64
10.7.2	Temperatura	66
10.7.3	Humedad Relativa.....	67
10.7.4	Vientos	69
10.8	Colombia 2009 – 2011.....	70
10.9	Colombia 2015-2016	71
10.10	Datos de entrada	71
10.11	Ejecución de HYSPLIT	72
10.12	Datos de salida.....	73
10.13	Configuración metodológica de la cuenca.....	74
10.13.1	Siembra y descripción de parcelas de aire.....	75
10.14	Configuración preliminar de la cuenca.....	81

10.15	Topografía.....	83
10.16	Criterios de planificación.....	87
10.16.1	Contaminación transfronteriza	87
10.16.2	Incidencia de fenómenos meteorológicos en el Ordenamiento Territorial	88
10.16.3	Cuencas atmosféricas como unidad de gestión y herramienta de planeación	89
	11. Conclusiones	90
	12. Recomendaciones	91
	13. Referencias Bibliográficas.....	93
	14. ANEXOS.....	104
14.1	ANEXO 1. "Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – Ciudad Montes"	104
14.2	ANEXO 2." Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – Mazu".....	105
14.3	ANEXO 3." Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – San Rafael"	106
14.4	ANEXO 4." Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – Zona Industrial"	107
14.5	ANEXO 5."Flujo de vientos promedio durante la mañana y la tarde en el 2008"	108
14.6	ANEXO 6."Mapa de contaminación por material particulado por.....	108
14.7	ANEXO 7."Mapa de isoconcentración de CO, SO2, NO2, O3, PM10, PM10 (respectivamente) en Bogotá año 2006 Escala"	109
14.8	ANEXO 8."Documento de consignación de datos en formato Excel"	110
	15. Glosario de términos.....	111

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de delimitación de la localidad de Puente Aranda.....	7
Figura 2. Escala de Beaufort.....	15
Figura 3. Distribución de los vientos globales.....	16
Figura 4. Células de convección atmosférica	17
Figura 5. Posición media de la ZCIT para los periodos enero y julio.....	18
Figura 6. Representación esquemática de las condiciones océano-atmosféricas del Pacífico tropical, durante los periodos normales y de ocurrencia de los fenómenos El Niño.....	19
Figura 7. Organigrama de la gestión sobre el aire y la atmósfera en Bogotá	27
Figura 8. Flujograma del proceso de investigación.....	31
Figura 9. Plan de trabajo por fases	33
Figura 10. Mapa de zona de estudio: ubicación del corredor industrial con las principales fuentes fijas y móviles de la localidad de Puente Aranda.....	35
Figura 11. Comparativo de UPZ de Puente Aranda.....	36
Figura 12. Episodios de cambio de temperatura, relacionados a los fenómenos de El Niño (rojo) y La Niña (azul).	37
Figura 13. Humedad relativa mensual media del periodo 2006-2009 y su comparación con meses de estudio de 2010.....	39
Figura 14. Mapa de humedad relativa promedio del trimestre EFM 2010, Bogotá (RMCAB).	40
Figura 15. Humedad relativa mensual media del periodo 2006-2009 y su comparación con meses de estudio de 2010.....	41
Figura 16. Valores de humedad relativa registrados en la estación Aeropuerto El Dorado, año 2009-2011.....	41
Figura 17. Promedios humedad relativa estaciones de la RMCAB, año 2015.....	42
Figura 18. Velocidad y dirección del viento promedio en el 2010	43
Figura 19. Velocidad y dirección promedio del viento en al año 2015.....	44
Figura 20. Rosa de vientos diciembre de 2010	45
Figura 21. Rosa de vientos diciembre de 2015	46
Figura 22. Rosa de vientos diciembre de 2016	47
Figura 23. Climograma Puente Aranda 2010	48
Figura 24. Climograma Puente Aranda 2015	49
Figura 25. Climograma Puente Aranda 2016	50
Figura 26. Promedio mensual de PM10 años 2010-2011.....	52
Figura 27. Promedio mensual PM10 años 2015-2016.....	53
Figura 28. Promedio mensual de SO2 Puente Aranda para 2010.....	54
Figura 29. Promedio mensual de SO2 Puente Aranda para 2015.....	55
Figura 30. Promedio mensual de SO2 Puente Aranda para 2016.....	55
Figura 31. Promedio mensual de NO y NO2 Puente Aranda para 2010.....	56
Figura 32. Promedio mensual de NO y NO2 Puente Aranda para 2015.....	57
Figura 33. Promedio mensual de NO y NO2 Puente Aranda para 2016.....	57
Figura 34. Comportamiento de las precipitaciones en Colombia por meses en los últimos 30 años	65
Figura 35. Campos medio del viento en superficie para los meses de febrero y agosto, con base en los datos del Reanalysis NCEP/NCAR, para el periodo 1968-1996.....	69
Figura 36. (a, b). Variación de la varianza total entre clústeres (TSV) durante las últimas 30 etapas, correspondientes a las trayectorias calculadas a 1000 m en el año 2010, en la cual se emplearon un total de 116 trayectorias. b) Recorrido de los centros de los c.....	74
Figura 37. Representación de las trayectorias de masas de aire a 500 m de altura en diciembre del 2010	76
Figura 38. Representación de las trayectorias de masas de aire a 750 m de altura en diciembre del 2010	76
Figura 39. Representación de las trayectorias de masas de aire a 1000 m de altura en diciembre del 2010	77
Figura 40. Representación de las trayectorias de masas de aire a 500 m de altura en diciembre del 2015	78
Figura 41. Representación de las trayectorias de masas de aire a 750 m de altura en diciembre del 2015	78
Figura 42. Representación de las trayectorias de masas de aire a 1000 m de altura en diciembre del 2015	79

Figura 43. Representación de las trayectorias de masas de aire a 500 m de altura en diciembre del 2016	80
Figura 44. Representación de las trayectorias de masas de aire a 750 m de altura en junio del 2016	80
Figura 45. Representación de las trayectorias de masas de aire a 1000 m de altura en junio del 2016	81
Figura 46. Cuenca conformada por subdominios	82
Figura 47. Conformación final de la cuenca.....	83
Figura 48. Mapa de relieve de la región de estudio hacia el noroeste.....	84
Figura 49. Mapa de relieve de la región de estudio hacia el sureste	85
Figura 50. Mapa de la topografía de interés	86

Lista de Tablas

Tabla 1. Documentos elegidos para desarrollo del estado del arte	20
Tabla 2. Marco normativo de la investigación.....	26
Tabla 3. Variables y aspectos de la investigación.....	30
Tabla 4. Técnicas e instrumentos de recolección y sistematización de datos.....	34
Tabla 5. Reglas para estimar la clase de estabilidad atmosférica y las alturas de la mezcla a partir de la velocidad del viento y el grado de insolación.	51
Tabla 6. Datos meteorológicos promediados para el periodo de enero de 2008 hasta diciembre de 2018 en la estación de monitoreo de calidad del aire de Puente Aranda.....	58
Tabla 7. Contaminantes criterios promediados para el periodo de enero de 2008 hasta diciembre de 2018 en la estación de monitoreo de calidad del aire de Puente Aranda.....	59
Tabla 8. Normativa nacional e internacional para contaminantes criterio medida en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	60
Tabla 9. Promedio del índice porcentual de excedencias de la norma de calidad del aire	61
Tabla 10. Descripción de los datos de entrada de HYSPLIT	72

1. Resumen

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos constituyen una herramienta importante para realizar evaluaciones de problemas que afecten la calidad del aire de un territorio. Debido al constante crecimiento demográfico y desarrollo de nuevas industrias, las cuales muchas veces no ejercen un control pertinente de sus emisiones, se acentúan los impactos negativos en la salud del tipo respiratorios y cardiacos por emisiones influenciadas por la meteorología. El presente proyecto busca determinar la trayectoria de la contaminación por gases y material particulado en la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá, Colombia, y su incidencia en el bienestar de los habitantes del sector, definiendo el origen y dirección de dichos riesgos químicos. Por medio del uso del modelo HYSPLIT se calculan y modelan los rangos estadísticos concentrados de contaminantes con ayuda de la información disponible en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) para treinta años contando desde el mes de enero de 1987 hasta diciembre de 2018, durante los periodos que se presentan los fenómenos El Niño y La Niña, mediante métricas cualitativas (series de tiempo y gráficas de dispersión) y cuantitativas (indicadores estadísticos). Al evaluar el comportamiento de las masas de aire en la región de incidencia, se pudieron relacionar los factores meteorológicos que afectan la dispersión de contaminantes y se logró plantear criterios útiles para la planificación regional.

Palabras clave: Calidad del aire, Cuencas atmosféricas, Masas de aire

2. Abstract

The dispersion models of atmospheric pollutants are an important tool to present evaluations of problems that affect the air quality of a territory. Due to the constant demographic growth and development of new industries, which often do not exercise relevant control of their emissions, the negative impacts on the health of the population due to respiratory or cardiac events are accentuated. The present project seeks to determine the trajectory of contamination by criteria gases and particles in the town of Puente Aranda in the city of Bogotá, Colombia, and its impact on the welfare of the inhabitants of the sector, defining the origin and direction of said chemical risks. Through the use of the HYSPLIT model, the concentrated statistical ranges of pollutants are calculated and modeled using the information available in the Bogotá Air Quality Monitoring Network (RMCAB) for ten years, from January 2008 to December 2018, during the periods that the El Niño and La Niña phenomena are presented, through qualitative metrics (time series and scatter plots) and quantitative (statistical indicators). When evaluating the behavior of the air masses in the region of incidence, the meteorological factors that affect the dispersion of pollutants could be related and useful criteria for regional planning were raised.

Keywords: Air quality, Atmospheric basins, Air masses

3. Introducción

Según el Decreto 948 de 1995, los contaminantes del aire son clasificados en dos grados. Aquellos de primer grado, son los emitidos de forma rutinaria o de manera accidental, los cuales pueden ser causantes de enfermedades respiratorias agudas, cáncer y mutaciones genéticas. Los de segundo grado son aquellos que, sin afectar el nivel de inmisión, generan daño a la atmósfera; estos son capaces de disminuir o destruir la capa de ozono y contribuyen al agravamiento del cambio climático. Estos conceptos serán tomados en cuenta durante la investigación.

La calidad de la atmósfera y del aire de Colombia es un tema importante para la estabilidad climática y para la salud de las personas. Después del desarrollo de la industria en la ciudad de Bogotá y de la implementación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, se ha evidenciado un gran aumento en problemáticas relacionadas con la calidad del ambiente de la ciudad. Sin embargo, las repercusiones que se observan al respecto solo han sido tomadas en cuenta en el centro de emisión y su zona de influencia, que es la ciudad, pero el movimiento de las masas de aire en la parte intermedia y superior de la atmósfera está provocando arrastre de los contaminantes a otras regiones del país.

Este proyecto se ha articulado para el reconocimiento de la dispersión de material particulado y otras sustancias generadas por la industria ubicada en Puente Aranda, Bogotá a través del movimiento de las masas de aire por la cuenca atmosférica donde se encuentra la zona industrial. Para esto se realizará la consulta en bases de datos a partir de información meteorológica, climática y topográfica y una modelación en HYSPLIT para la predicción e ilustración del área y del movimiento de la cuenca atmosférica relacionada a Puente Aranda; así se abordará una aproximación a la incidencia de la contaminación atmosférica provocada en un punto específico, sobre regiones del país que no cuentan con ordenamiento territorial que tenga en cuenta los riesgos y consecuencias imprevistas por este fenómeno de movimiento espacial de sustancias tóxicas en grandes áreas.

En este documento se observan los marcos de referencia, con los cuales se pretende dar un acercamiento al lector donde se describen los conceptos, metodologías y características propias de la zona de estudio, entre las cuales se enmarcan las problemáticas y los factores que afectan el movimiento de las masas de aire y el control de emisiones en el país y a nivel internacional. Posteriormente se plantean las bases que sustentan la propuesta de este proyecto (objetivos, hipótesis, justificación y planteamiento del problema). Finalmente se desarrolla la exhibición de los resultados, junto a sus respectivos análisis, conclusiones y recomendaciones.

4. Planteamiento del problema

Dentro de las áreas urbanas, la contaminación del aire y de la atmósfera hasta ahora se ha abordado como el resultado de la presencia de fuentes de emisión fijas y móviles tales como industrias, vehículos automotores y actividades domésticas, de manera que estas alteran la composición de la atmósfera, trayendo como resultado problemas de salud. (Palacio, et. al, 2014). La localidad de Puente Aranda, como zona de mayor generación de emisiones atmosféricas en la ciudad, concentra actividades de tipo industrial, comercial, residencial e institucional que desencadenan problemáticas ambientales y conflictos sociales, afectando directamente la calidad de vida de la población. Cabe destacar que dentro del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá (Decreto 190 de 2004), esta localidad es una de las dos zonas industriales de la ciudad, en la cual se establecen circuitos productivos que encadenan actividades industriales consideradas de alto impacto ambiental (Recio, 2017).

En cuanto a la calidad del aire, los datos suministrados por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá, se ha logrado establecer que la localidad de Puente Aranda se encuentra en un nivel moderado de contaminación ya que durante el año 2009 y en el periodo transcurrido 2010 se han presentado niveles de concentración entre los $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $100\mu\text{g}/\text{m}^3$; en el primer semestre de 2011 la media fue de $55\mu\text{g}/\text{m}^3$, excediendo el valor guía de la norma establecida por Organización Mundial de la Salud para promedios anuales.

En los que respecta al año 2014, el promedio máximo de concentración diaria para PM_{10} se presentó en la estación de Merck con un valor de $199\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se registró la media más alta de los promedios diarios $101\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe destacar que en 2014 hubo un cumplimiento anual de la norma de un 84% (Recio, 2017). De acuerdo con la Unidad de Servicios de Salud Sur (2016), de la Secretaría distrital de Salud, durante el año 2016, los datos de PM_{10} registrados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, el aire de Puente Aranda excede los estándares establecidos por la OMS en un 63,33%, mientras que de acuerdo con la Resolución 610 de 2010, los datos exceden los estándares de la normatividad en 3,33%. De acuerdo con lo anterior, se define que la localidad de Puente Aranda posee uno de los mayores problemas de contaminación en la ciudad por la presencia de altos niveles de PM_{10} .

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, se estima que la contaminación del aire exterior en zonas urbanas es responsable de 3,1 millones de muertes prematuras en todo el mundo cada año y del 3,2% de la carga mundial de enfermedades, sobre todo las de tipo respiratorio. Tal afirmación fue reforzada por Hernández (2010), quien asegura que los efectos en la salud incluyen incremento en la mortalidad diaria, el aumento en las tasas de hospitalización por exacerbación de enfermedades respiratorias, fluctuaciones en la prevalencia de uso del broncodilatador, tos, reducción de la función pulmonar.

Estudios realizados por el Hospital del Sur de Bogotá, identificaron como puntos críticos de contaminación atmosférica de la localidad, los corredores de la Avenida 68, la Avenida de las Américas, la Avenida Ciudad de Quito, la Avenida de los Comuneros (Calle 6), la Avenida Primera de Mayo, la Carrera 50, la Avenida Colón (Calle 13) y la Calle 11 Sur, todos estos relacionados con vías importantes de transporte, por donde, además, transitan habitantes de la ciudad y el sector. (Hospital del Sur, 2005). Los principales afectados son entonces adultos mayores y niños menores de 5 años. La asociación de la enfermedad respiratoria o cardiovascular con la contaminación atmosférica se observa principalmente en niños menores de 14 años. (Gauderman, 2006). El Hospital del Sur reporta en proyectos de calidad del aire, que en la localidad hay alta probabilidad de presencia de

síntomas o molestias asociadas al sistema respiratorio tales como irritación de mucosas en grupos sensibles y en algunas personas sanas (Alcaldía Local de Puente Aranda, 2012).

La localidad posee áreas arborizadas en el canal del río Fucha, la calle Sexta y los parques zonales Ciudad Montes, Milenta, Tejar y Jazmín. La proporción de habitantes por árbol es de 7,4 en la localidad con lo cual ocupa el décimo lugar en Bogotá (para el año 2009), ya que su índice es mayor al promedio de la ciudad que es de 6,2 hab/árbol. (Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría de ambiente, 2009). Para la Organización Mundial de la Salud, la proporción de habitantes por árbol con el fin de mantener una capacidad de absorción de contaminantes del aire facilitadas por la masa arbórea es de 3 hab/árbol. Dichos datos son importantes puesto que el impacto de la mala calidad de aire se relaciona directamente con la salud de los ciudadanos y se evidencia un índice muy bajo de biomasa (vegetación) con relación a cada habitante, la cual ayuda a purificar el aire.

En cuanto a la calidad de la atmósfera que pudiera ser afectada por las emisiones de la localidad de Puente Aranda como área fuente de contaminantes de diverso orden no se han realizado estudios sobre su trayectoria y deposición final, razón por la cual no es posible establecer un área de influencia de la contaminación atmosférica. Esta deficiencia pretende ser abordada por la investigación que se plantea teniendo como referente las cuencas atmosféricas definidas como áreas sobre las cuales se depositarían las sustancias que afectan la calidad del aire y de la atmósfera en un territorio determinado.

5. Pregunta de investigación

¿Cómo puede aportar el estudio de las cuencas atmosféricas con origen en la localidad de Puente Aranda, zona fuente de contaminación, por el transporte de contaminantes a largas distancias sobre el ordenamiento territorial regional?

6. Justificación

Bogotá es una ciudad que alberga poblaciones provenientes de todas partes del país, gente y todo tipo de actividades turísticas, que la hacen una ciudad ampliamente poblada, dada su expansión masiva durante los últimos años. Es por esto que el Distrito Capital debe contar con un Plan de Ordenamiento Territorial que tenga en cuenta las relaciones del impacto de las actividades en el territorio y su repercusión en otros territorios regionales o nacionales, así como los asuntos relacionados con la salud, la calidad del aire y la calidad de vida de sus habitantes y de los habitantes de otras regiones que puedan estar siendo impactadas por la calidad del aire en Bogotá. Por este motivo se propone la realización del proyecto de análisis del comportamiento de las cuencas atmosféricas, que cubren espacios más allá de los ocupados por el Distrito Capital para evidenciar las falencias en cuanto al control de la producción de material contaminante en el aire de Puente Aranda, de acuerdo al movimiento de las masas de aire en el sector y su proyección a otros espacios geográficos, en vista de que es precisamente en esta localidad donde se encuentra la Zona Industrial con mayor cantidad de operaciones basadas en la quema de combustibles para la producción, el uso de químicos para otros procesos, entre otros.

Paralelamente este estudio será un aporte a la creación del conocimiento y la consideración de la interacción de la actividad humana y la atmósfera, desde la metodología que será utilizada, para que, acompañada de revisión bibliográfica sobre calidad del aire en cuanto al daño que se está ocasionando, medidas de prevención y mitigación de las emisiones y otros puntos para sugerir en la inclusión de los resultados en la ordenación del territorio a nivel regional y los ajustes a nivel local en los próximos POT de Bogotá.

Los procedimientos referentes a la modelación de cuencas atmosféricas contarán con la utilización del programa HYSPLIT, el cual corresponde a la metodología más apropiada para el desarrollo de este proyecto, ya que, a diferencia de otros programas, este cuenta con las herramientas apropiadas para la modelación de cuencas atmosféricas a nivel regional y a diferentes alturas. A partir de este, se podrá establecer en qué medida se transporta la contaminación producida en un punto específico, en este caso, Puente Aranda sino también en las partes más altas de la atmósfera y su alcance macro regional, que como resultado puede causar su deterioro en otras regiones del país. Estos fenómenos de movilización de contaminantes en grandes masas de aire a distancias aún no determinadas, no se han tenido en cuenta en relación con la salud humana y el medio ambiente afectado.

7. Objetivos

7.1 Objetivo General:

Determinar cómo puede aportar al ordenamiento territorial regional por el transporte de contaminantes generados en el sector de Puente Aranda, Bogotá a través de la herramienta de modelación de las cuencas atmosféricas.

7.2 Objetivos Específicos:

1. Analizar las características meteorológicas y climáticas presentes en la Ciudad de Bogotá, Colombia en el Sector de Puente Aranda.
2. Conocer de manera preliminar las cuencas atmosféricas del Sector de Puente Aranda (Bogotá, Colombia) y las localidades en la periferia, mediante la modelación (HYSPLIT) del comportamiento de las masas de aire.
3. Proponer estrategias de planificación para el ordenamiento territorial con base en el modelamiento de la cuenca atmosférica a partir de Puente Aranda.

8. Marco de referencia

8.1 Marco de referencia biogeográfico y descripción del territorio

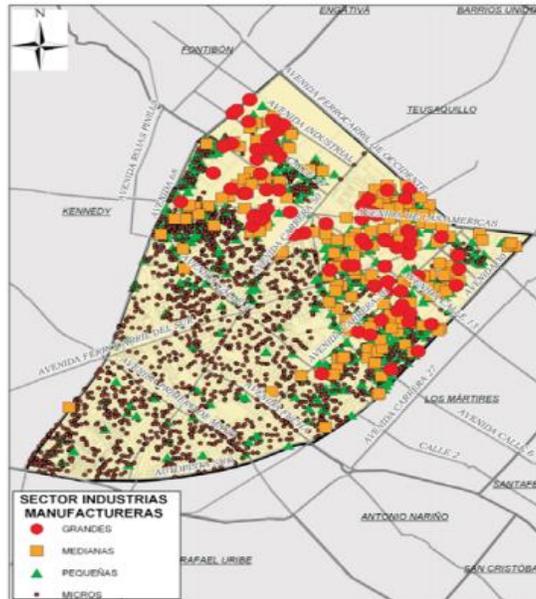
Puente Aranda es la localidad 16 dentro de la división administrativa del Distrito Capital. Está ubicada en la zona centro y por su extensión (1.724 ha.), representa el 2% del área total de la ciudad (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010). Limita al norte con la localidad de Teusaquillo, con la avenida de las Américas o avenida calle 23 y la avenida Ferrocarril de Occidente o avenida calle 22; al oriente con la localidad Los Mártires, con la avenida Ciudad de Quito o avenida carrera 30; al sur con las localidades Tunjuelito y Antonio Nariño, con la avenida del Sur o transversal 35 o avenida calle 45A Sur; y al occidente con la localidad de Kennedy, con la avenida del Congreso Eucarístico o avenida carrera 68 (Figura 1.). Posee una extensión en suelo urbano de 1731,1 ha; se encuentra subdividida en cinco UPZ clasificadas como zonas residenciales (40-Ciudad Montes; 41-Muzu; 43-San Rafael) e industriales (111 Puente Aranda-108 Zona Industrial) (Castillo Mejía, 2003).

Progresivamente, Puente Aranda se fue convirtiendo en una de las sedes principales de pequeñas empresas manufactureras las cuales fueron creciendo, consolidándose en un sector que era netamente residencial como resultado del fenómeno de desarrollo industrial que estaba enfrentando la ciudad para tal momento. En dicho lugar existen actividades variadas relacionadas con el uso de suelo y al mercado, es decir la industria y bodegaje de mercancías (Piedrahita Alfonso, 2014). La mayoría de industrias que allí se ven, están relacionadas con la elaboración y procesamiento de plásticos, textiles, químicos, metalmecánica, gaseosas, tabaco, concentrados e industrias alimenticias. Por otro lado, cuentan con zonas comerciales amplias y reconocidas como San Andresito de la Carrera 38 y Las Américas.

De acuerdo a la Secretaría de Hacienda (2004),

El principal río de la localidad es el río Fucha, el cual nace en los cerros orientales; a la altura de Vitelma, luego se desliza por la hoya ubicada entre la Escuela de Apoyo de Servicio para el Combate (costado norte) y los barrios La Gran Colombia y San Cristóbal (costado sur). A partir de la carrera 6ª con calles 13 y 14 sur, éste es canalizado hasta la avenida Boyacá, en donde termina el canal artificial, y continúa su curso hasta desembocar en el río Bogotá. De igual manera, esta localidad incluye los vallados de río Seco, Albino y Comuneros, que fueron canalizados. Los anteriores ríos, junto con el caño San Francisco, pertenecen a los ecosistemas de protección hídricos de la ciudad. Su preservación y uso adecuado incide en detener el proceso de deterioro actual del río Fucha y, por ende, del río Bogotá (p. 2).

Figura 1. Mapa de delimitación de la localidad de Puente Aranda



Fuente. Dirección de estudios e investigación de la CCB. Registro mercantil, 2006.

Bogotá cuenta con Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C (2018) dentro del cual citamos:

La política de ecoeficiencia que adopta el POT de Bogotá se constituye en una orientación de las medidas y procedimientos necesarios para garantizar la interacción responsable y eficiente de los procesos de ocupación del territorio y del consumo de bienes naturales actuales y futuros, como el suelo, el agua, el aire y los demás recursos naturales y energéticos con que cuenta el territorio distrital; para asegurar el uso eficiente y el mayor beneficio social, económico y ambiental para sus habitantes; así como para consolidar relaciones sostenibles de recuperación, preservación y conservación de las estructuras ambientales distritales y de los ecosistemas urbanos, rurales y regionales, y el fortalecimiento de la capacidad de resiliencia ante eventos naturales imprevistos. La política de ecoeficiencia territorial hace parte de la triada de políticas enfocadas en el desarrollo ambiental sostenible y en el aumento de la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras de Bogotá. Se deriva de la idea de consolidar un modelo de ocupación territorial compacto, adaptativo y de bajo consumo energético, orientando sus contenidos a definir los objetivos, estrategias, programas y proyectos de ordenamiento territorial y de desarrollo urbano y rural, dentro del marco de una gestión ambiental basada en metas concretas y realizables (p. 24).

Lo anterior articula el POT de la ciudad con el objetivo a alcanzar del presente proyecto puesto que se busca definir una estrategia de ordenamiento para la localidad de Puente Aranda a partir de un diagnóstico ambiental relacionado con la calidad de aire que se tiene en dicha área.

La contaminación atmosférica en la localidad de Puente Aranda se origina fundamentalmente en las emisiones puntuales provenientes de grandes, medianas y pequeñas industrias que tienen su sede en la localidad, así como fuentes móviles, dado el alto tráfico automotor que caracteriza las vías de la localidad

(Secretaría de Hacienda, 2004). De acuerdo a los registros de la Secretaría de Ambiente de Bogotá, los motivos más frecuentes de contaminación por emisiones atmosféricas son el material particulado producido por las fábricas de maderas, gases generados por tintorerías y establecimientos que utilizan como combustible el carbón o ACPM (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010).

Según la Secretaría de Hacienda (2004), la estación de Calidad del Aire del Departamento de Medio Ambiente (Dama) registra normalmente concentraciones altas de dióxido de azufre (SO₂), que no excede la concentración permitida por la normatividad, pero que, en condiciones diarias, resulta nocivo. Por otro lado, el material particulado se ha excedido por más de 50% de lo permitido por la norma, siendo este, el mayor contaminante de la localidad, de igual manera ocurre con los niveles de concentración de ozono en el aire, es superior a lo permitido.

8.2 Marco teórico - conceptual

La calidad del aire es un concepto que en Colombia se utiliza como indicador multipropósito en el que se calculan las concentraciones de contaminantes atmosféricos, en un momento y punto específico para comunicar el riesgo ambiental y a la salud a la ciudadanía. A partir del cálculo de dichos contaminantes se han propuesto parámetros límites, establecidos por las autoridades competentes, para tomar medidas en cuanto se vea comprometida la salud, a partir de la prohibición de circulación del equipo automotor desactualizado y la reglamentación de descarga de emisiones para las instalaciones industriales dependiendo de la naturaleza de sus actividades y su ubicación.

La evaluación del estado y la naturaleza de la atmósfera es un tema importante para el estudio del control de la contaminación del aire y la atmósfera. Esta última corresponde a una capa gaseosa que rodea a la tierra cuya función es sellar y proteger a la misma del vacío del espacio y la radiación electromagnética solar (Cepeda, 2000). La composición de la atmósfera y los procesos que en ella se llevan a cabo tienen gran influencia en la actividad humana y el comportamiento del medio ambiente en general (IDEAM, s.f.). Está compuesta por un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón, así como de rastros de otros gases, lo cual constituye el fluido que la conforma denominado aire. No obstante, la variable que depende directamente del lugar de estudio que se esté revisando es la humedad de la atmósfera.

Sumado a lo anterior, la atmósfera se compone de capas, las cuales constituyen una frontera inferior perfectamente bien definida, la superficie de la tierra y los océanos. Su frontera superior no está tan bien definida. La mitad de la masa de la atmósfera está aproximadamente a 3.4 millas de la superficie, y el 99% está más o menos a 20 millas de la superficie (Nevers, 1998). La troposfera es la capa atmosférica más baja. En promedio, se extiende desde el suelo hasta unos 10 kilómetros (6 millas) de altura. Casi todo el clima se desarrolla en la troposfera, ya que contiene el mayor volumen de vapor de agua de la atmósfera. La estratosfera es crucial para la vida en la Tierra porque contiene pequeñas cantidades de ozono y una forma de oxígeno que impide que los dañinos rayos UV lleguen a la Tierra; es la región dentro de la estratosfera donde se encuentra la capa de ozono (Meteoblue, 2018).

En lo que a contaminantes del aire y atmosféricos respecta, hasta el Decreto 02 de 1982, el recurso aire consideraba principalmente los aspectos relacionados con la emisión de contaminantes a la atmósfera, haciendo énfasis en las fuentes fijas que en gran medida corresponden al sector industrial. Sin embargo,

a partir de la promulgación del Decreto 0948 de 1995 y sus reglamentaciones se da un cambio en la conceptualización sobre la administración del recurso aire y es así como se comienzan a contemplar los siguientes aspectos: el reglamento de protección y control de calidad del aire para todo el país, los principios generales para proteger la atmósfera, mecanismos de control, atención y prevención a episodios de contaminación, normas fijas para los estándares de calidad del aire y control de emisiones de fuentes fija y móviles, de emisión de ruidos y olores ofensivos, instrumentos de control, vigilancia y régimen de sanciones por infracción además de la participación ciudadana en el control de contaminación atmosférica (Avellaneda, 2013).

De igual forma, dentro del Decreto 0948 de 1995, se señalan los diversos tipos de contaminantes, dividiéndolos en dos: los de primer grado los cuales afectan a la salud y la calidad del aire o el nivel de inmisión, tales como el ozono troposférico o "smog" fotoquímico y sus precursores, el monóxido de carbono, el material particulado, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el plomo y los de segundo grado que afectan la atmósfera ya sea porque contribuyen al deterioro de la capa de ozono o al cambio climático. Ejemplo de estos son los compuestos químicos capaces de contribuir a la disminución o destrucción de la capa estratosférica de ozono, o las emisiones de contaminantes que contribuyen al agravamiento del "efecto invernadero" o cambio climático global. La autoridad ambiental dará prioridad al control y reducción creciente de las emisiones de estas sustancias y de los tipos de contaminación atmosférica de que trata este artículo.

Por otro lado, para principios de los años 40, cuando recién iniciaba la expansión de Bogotá como capital de Colombia, el Estado contrató a Karl Brunner para el diseño del occidente de la ciudad, quien, al modificar y ampliar vías de alto movimiento vehicular, dio origen al proceso de densificación, concentración y una diversificación industrial significativa, ubicando dichos procesos en Puente Aranda. Actualmente, esta es la principal zona Industrial de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010). La localidad de Puente Aranda congrega diferentes actividades de tipo industrial, comercial, residencial e institucional que desencadenan problemáticas ambientales y conflictos sociales, lo que redundo en el detrimento de la calidad del ambiente y por ende de la calidad de vida.

La primacía industrial de Bogotá y su cercanía con la comunicación internacional por medio del aeropuerto de "Techo", llamado posteriormente "El Dorado", fueron determinantes para que gran cantidad de empresas manufactureras eligieran la ciudad como sede. De esta manera, se vincularon al sector empresas de plásticos, textiles, químicos, farmacéutica, metalmecánica, gaseosas, concentrados e industrias alimenticias que tienen su asiento hoy en Puente Aranda (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2010).

En el año 2006 la presente zona fue oficialmente reportada como un área con una alta contaminación atmosférica, debido a las concentraciones de PM_{10} (partícula de tamaño menor o igual a $10 \mu m$) puesto que los límites establecidos en la legislación excedieron la norma en un 75% de los casos, con respecto de la norma anual de $70 \mu g/m^3$ expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT): Resolución 601 de 2006. (Palacio Soto, et. al, 2014).

Por consiguiente, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá realiza monitoreo continuo de los contaminantes criterio, controlando las emisiones de fuentes antropogénicas, a través de normas de calidad del aire y normas de emisión (Rojas, s.f.). De la misma manera, la carga vehicular que tiene paso por estos territorios aporta a la contaminación por CO_2 en el sector. La industria también es culpable de esto, lo que se evidencia en los malos olores que se generan en las horas de la tarde y cuando el viento

no logra llevarse el material particulado de las chimeneas, de donde emana el desecho tóxico y gaseoso de los procesos industriales (Hospital del Sur, 2014).

Las partículas que generan daños a la salud son aquellas de tamaño por debajo de $2.5 \mu\text{m}$ y medir incluso menos de $0.1 \mu\text{m}$ de diámetro (Harrison et al, 2000), las cuales son llamadas "partículas ultrafinas". Estas son conocidas como "respirables", ya que pueden penetrar los mecanismos de defensa del sistema respiratorio y llegar hasta los bronquios o incluso al alveolo pulmonar. Por su parte, Puente Aranda ha presentado un aumento de PM_{10} en los últimos 5 años. Entretanto, para que los efectos en la salud sean evidentes, se deben tener en cuenta el tamaño de partícula y la concentración de las partículas, que varían según las fluctuaciones diarias de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} .

Lo anterior nos da información sobre la importancia de Puente Aranda como zona fuente de contaminación atmosférica y de la calidad del aire, factor que puede estar incidiendo en otras áreas geográficas a partir de los movimientos de las grandes masas de aire en niveles superiores de la atmósfera.

Masas de Aire. Una vez entendido el contexto, a continuación, se presentan los temas relacionados a la situación que se viene presentando, comenzando con la comprensión de la importancia de las masas de aire. El concepto fue introducido por los meteorólogos Bergeron y Bjerknæs en los años 20, definiendo el término como "un volumen de aire de gran extensión cuyas propiedades físicas, sobre todo temperatura y humedad, son uniformes en el plano horizontal". Su tamaño cubre por lo general centenares e incluso miles de kilómetros cuadrados y verticalmente puede alcanzar espesores de varios kilómetros. Los factores que influyen en las propiedades de las masas de aire son la naturaleza u origen, la dirección del movimiento y los cambios que puedan suscitarse debido a la superficie en la que se encuentran (Hernández, 2012).

Una masa de aire puede clasificarse en función de dos factores: propiedades de la temperatura, dependiendo de la latitud donde se genere, que puede ser tropical, polar o ártica y el tipo de superficie en la que se origina, marítima o continental (Camelo y Valbuena, 2017). La interacción entre diferentes masas de aire conlleva a que las propiedades pasen gradualmente de una a otra. A estos se les denomina frente, los cuales influyen en el tiempo y clima de una región (Bidegain, 2010). Los trabajos realizados se han desarrollado por medio de modelos meteorológicos a los que se les ha integrado modelos de dispersión y transporte de contaminantes, por lo que se ha impulsado determinar el origen de las masas de aire y el flujo de éstas por la atmósfera, fenómeno conocido como cuencas atmosféricas, con interés particular en utilizar estas para entender la dispersión y deposición de contaminantes y materiales peligrosos en grandes áreas (Stein, et al., 2015).

Cuencas Atmosféricas. Por su parte, establecer la delimitación de las cuencas atmosféricas permite determinar un volumen de aire homogéneo que fluye por un área geográfica, delimitado por relieve, obstáculos topográficos de origen natural o por factores relacionados con las características meteorológicas y climáticas condicionantes de determinado territorio, donde existe la influencia de focos emisores de contaminación naturales o antropogénicos (Magaña y Caetano, 2007). De esta forma se modifica la circulación general de la atmósfera sobre ésta en su capa límite, y se forman vientos locales con diferentes flujos de atmósfera libre (Davydova, 2019).

Experiencias desarrolladas en países como Estados Unidos, Canadá, Filipinas, India, Reino Unido y Grecia han permitido el desarrollo de estrategias de planificación ambiental a partir de las cuencas

atmosféricas y su comportamiento. Se han adelantado normativas de regulación de la calidad del aire y se han adoptado medidas preventivas y de minimización por medio de la implementación de programas y acciones que aseguren una calidad del aire satisfactoria (Rodríguez, 2016). En Latinoamérica se han evidenciado avances grandes en México, donde se consolidó el concepto de cuencas atmosféricas, dando buenos resultados en la aplicación de la herramienta para el ordenamiento territorial.

En dicho país se han definido siete cuencas atmosféricas desde el año 2007, fecha en la que se construyó una propuesta metodológica para la determinación de las cuencas con base en modelos atmosféricos en los que se obtuvo un primer nivel de información para la gestión de la calidad del aire (INECC, 2007). También se demostró su potencial para ofrecer otro tipo de servicios ambientales enfocados al monitoreo, prevención y gestión de la atmósfera e inclusive como una herramienta de soporte para la implementación de políticas de gestión ambiental territorial. Gracias a ello se introdujo el concepto dentro de la Ley General del Equilibrio y la Protección al Ambiente, realizada para prevenir y controlar la contaminación de la atmósfera, esto se desarrolló de acuerdo a la capacidad de asimilación de contaminantes de la cuenca atmosférica y se le estableció un máximo permisible a la misma. Dicha legislación busca reconocer que la contaminación ambiental no tiene fronteras y, por tanto, debe ser atendida con una visión integral que concilie el equilibrio ecológico con el crecimiento económico y las actividades sociales. Para el estudio de las cuencas atmosféricas y su modelación espacio temporal, se han desarrollado varios modelos a partir de los datos meteorológicos a varias alturas sobre el nivel de ubicación de las zonas fuente dentro de los cuales está el modelo HYSPLIT, que se utilizará en este trabajo.

Modelo HYSPLIT. De manera análoga, en previos proyectos donde se ha utilizado de modelo HYSPLIT (Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única, desarrollado por el Bureau of Meteorology of Australia y el Air Resources Laboratory (ARL) en Estados Unidos), se han aprovechado sus funciones para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire y determinar orígenes de fuentes de contaminantes atmosféricos a diferentes alturas (González, 2009). En Colombia, se tienen antecedentes de modelación de la calidad del aire para partículas, mediante el uso del modelo de dispersión HYSPLIT, en la investigación de los orígenes de las masas de aire en cuatro ciudades del país en el 2012. Con este se midieron las retro-trayectorias para determinar la zona de partida de las cuencas atmosféricas que atraviesan a estas ciudades (Bogotá, Cartagena, Pasto y Leticia). En este estudio se evidenció que los fenómenos de transporte de material particulado difieren en las ciudades estudiadas, por lo cual concluyen que los próximos estudios deberán realizarse a nivel regional (Ramírez, 2014), para obtener mejores resultados en cuanto a estrategias de ordenamiento territorial que tengan en cuenta las cuencas atmosféricas y de esta forma contribuyan al ordenamiento territorial regional que tenga como uno de sus objetivos el mejoramiento de la salud ambiental de la población.

La modelación de la calidad del aire es importante para el establecimiento de criterios de control de emisiones, por lo que se han desarrollado los modelos de dispersión, que definen redes óptimas de seguimiento de la contaminación atmosférica y predicen el comportamiento de las emisiones con sus dinámicas y respuestas a diferentes perturbaciones (Zannetti, 1990). La última versión de HYSPLIT realiza un amplio rango de simulaciones relacionadas con el transporte a gran escala, dispersión y deposición de contaminantes, permite el monitoreo y pronóstico del movimiento y concentración de las partículas de aire o contaminación en incendios, tornados, huracanes y contaminación producida por actividad antrópica (González, et. al, 2009). HYSPLIT es un modelo de solución lagrangiana, que se centra en el comportamiento de partículas o elementos discretos de contaminantes representativos en las diferentes especies en la atmósfera, considerando a través de funciones, un régimen turbulento en una posición, un tiempo, una trayectoria y una posición final (Hernández, et. al, 2015).

Reanálisis NCEP/NCAR. Se trata de un modelo numérico analítico/predictivo orientado a la obtención de información meteorológica mensual o diaria de diversos parámetros que condicionan las condiciones climáticas alrededor del globo, tales como la temperatura, humedad relativa, precipitación, presión atmosférica. Dichos paquetes de datos se encuentran disponibles desde el año 1948 hasta la actualidad y poseen una cobertura a nivel mundial, constituyendo una herramienta ideal para el estudio del clima local o regional. Son de gratuitos y de libre acceso. (Kalnay, et al., 1996).

Fue desarrollado por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, formalmente conocido como el Centro Nacional de Meteorología-NMC) y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) de Estados Unidos, como respuesta al inminente cambio climático y los cambios introducidos en el Sistema Operacional de Asignación de Datos Globales (GDAS) con el fin de mejorar las predicciones climáticas para la última década. Este proyecto además busca permitir la asimilación de información tomando como base los 40 años en que se han venido tomando los datos, buscando que los investigadores del clima faciliten el análisis o evaluación de anomalías climáticas actuales definiendo si son significativas comparadas con el análisis en el tiempo definido del Reanálisis. (Kalnay, et al., 1996).

Ordenamiento Territorial y Salud Ambiental. A partir de las cuencas atmosféricas se pueden plantear soluciones a los problemas de ordenamiento territorial. Esto es problemático puesto que el POT debe seguir los lineamientos de desarrollo económico. La planeación urbana practicada en el país en los últimos 50 años se estuvo desarrollando bajo las figuras del Código de policía (normas sanitarias), el Plan Integral de Desarrollo (PID) de 1978, la Constitución Política de 1991 (artículo 336. Funciones de los concejos municipales) y la Ley 388 de 1997, Ley de Desarrollo Territorial. En Colombia se implementó la Ley Orgánica 1454 en el año 2011, donde se dictan las normas de ordenamiento territorial; en esta se determina que la finalidad de la implementación del ordenamiento territorial es promover la capacidad de descentralización, planeación y administración de las entidades que fomentarán el desarrollo económico, social, cultural, ambiental y sostenible del territorio regional y nacional.

Con la creación del Código Sanitario Nacional (Ley 9 de 1979), se adoptó un enfoque amplio de los aspectos que intervienen en la salud humana incluyendo elementos específicos en relación con la protección del medio ambiente (García, et. al, 2012). Tras la redacción de la Constitución de 1991, en el año 1993, se estudiaron y expidieron por separado la Ley 99, relacionada con medio ambiente, y la Ley 100, que se ocupó del sistema de salud (García, et. al, 2012). Hasta el 2008 se elaboró por primera vez en Colombia una política que integra a los factores ambientales que afectan la salud de las personas (Conpes 3550), allí se cubren áreas de calidad del agua, calidad del aire y seguridad química; donde se priorizan los asuntos referentes a la salud ambiental. La salud ambiental está definida como un proceso complejo de interacción dinámica entre el individuo y su medio ambiente (Sánchez y Castillejo, 1984).

8.2.1 Descripción de variables meteorológicas y climatológicas

En Colombia, el clima varía dentro de fluctuaciones temporales que se ven determinados por los procesos atmosféricos. Existen claras evidencias de la influencia de los procesos termodinámicos de los océanos que rodean al país en la variabilidad de la precipitación en Colombia, se ha establecido igualmente que el ciclo del fenómeno ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) afecta también la temperatura del aire

(Montealegre, 2014). En esta sección se explican las influencias meteorológicas más significativas relacionadas a los fenómenos atmosféricos sobre el país.

Variabilidad climática en el océano. En el espacio marítimo tropical de Colombia, se presentan las interacciones más importantes con la atmósfera, dando lugar a variaciones climáticas de gran escala (Chang, et al., 2006). El océano Pacífico y el mar Caribe de Colombia, están relacionados directamente con la variabilidad térmica, el clima y la atmósfera, es por esto que son determinantes en la variabilidad interanual de la precipitación del país (Montealegre, 2009).

El comportamiento estacional de la zona de confluencia intertropical (ZCIT), está ligado a la dinámica de la temperatura de la superficie del mar. Según Enfield (1997), el calentamiento del Atlántico sur mantiene a la ZCIT más al sur de su posición normal, ocasionando el incremento de lluvias al noreste del continente sudamericano, mientras que el calentamiento del atlántico norte, provoca que el ZCIT se desplace al norte, provocando sequías en el mismo lugar.

La oscilación del sur ENOS es un fenómeno oceánico atmosférico que manifiesta la interacción entre las aguas superficiales del océano Pacífico tropical con la atmósfera. Se caracteriza por mostrar el contraste de las temperaturas inusualmente calientes en el océano Pacífico ecuatorial, las cuales provocan importantes consecuencias en el clima alrededor del globo. Entre estas consecuencias, se encuentra el incremento de precipitaciones en el sur del hemisferio norte y sequías, hasta devastadores incendios en el Pacífico occidental. Por un lado, el fenómeno de El Niño es resultado de la interacción inestable de las capas superficiales del océano y la atmósfera suprayacente del Pacífico tropical. El sistema oscila entre una periodicidad de 3 a 4 años (Montealegre, 2007).

La afectación del régimen de lluvias por la fase cálida del ciclo ENOS no sigue un patrón común, se ha identificado que cuando se presenta el fenómeno hay una clara tendencia hacia la disminución de los volúmenes de precipitación en las regiones Andina, Caribe y Pacífico. Sin embargo, se observa un crecimiento en la cantidad de lluvias en el suroccidente de la Amazonía, en el Piedemonte llanero y el sur de la región pacífica (Montealegre, 2007).

Por el contrario del fenómeno de El Niño, el fenómeno de La Niña se caracteriza por presentar anomalías en las temperaturas las cuales son inusualmente frías en el océano Pacífico ecuatorial (NOAA, 2018). Según el análisis realizado por Montealegre (2009), más de la mitad de los episodios documentados de la fase fría del ciclo, se han iniciado a partir del segundo trimestre del primer año, la lluvia es relativamente normal durante los primeros dos trimestres, la lluvia incrementa a partir de allí, viéndose reflejado el efecto climático en las regiones Andina, Caribe y Pacífica; finalmente para el segundo semestre del segundo año, el efecto se debilita notablemente y el efecto de lluvias vuelve a su normalidad (Pabón y Montealegre, 1998).

Las variables incidentes en el fenómeno ENOS que caracterizan a las principales zonas climáticas del país se presentan gracias a la posición estratégica que este posee, permitiendo que el territorio sea objeto de una alta cantidad de energía solar dirigida a la Tierra. Precisamente son los trópicos los que absorben la mayor parte de dicha energía la cual se transfiere posteriormente a la atmósfera, de manera que se configure el desplazamiento del aire a través de las latitudes ecuatoriales y los polos, por medio de una circulación meridional (CIOH, 2010).

En cada hemisferio existen dos masas de aire principales: el aire tropical y el aire polar, que a su vez se dividen en aire marítimo y continental. Dicha distribución del viento y la presión a gran escala persisten todo el año o se repiten en patrones estacionales, lo cual se denomina circulación atmosférica general (Retallack, 1975). Una de las causas motrices principales de esa distribución es el calentamiento desigual en todas las zonas del planeta, en latitudes altas y bajas específicamente. Dicha situación provoca que las distintas masas de aire con sus respectivas temperaturas busquen situaciones de equilibrio térmico (Terra, et al, 2011).

De acuerdo con Zambrano (1986), el mecanismo que explica la circulación atmosférica es el de la chimenea ecuatorial que se fundamenta en el siguiente principio: “el aire cálido del Ecuador se eleva y origina una zona de bajas presiones que atrae los vientos alisios. En altura, el aire ecuatorial se acumula para dirigirse luego hacia las latitudes subtropicales, creando así una corriente de altitud (los contralisios) que, al descender, origina las altas presiones subtropicales. Desde estas últimas, el viento se escapa, de una parte, hacia el Ecuador (alisios), y de otra, hacia las latitudes templadas (vientos del Oeste)”. Una vez comprendido el concepto del aire, procedemos a introducir el concepto de los vientos y su comportamiento a escala macro regional y local.

Factores que afectan las dinámicas del viento. Cuando se hace referencia al viento, se hace referencia a la variable del estado de movimiento del aire tanto vertical como horizontal, por lo cual puede ser considerada tanto una cantidad vectorial como una variable primaria por naturaleza. Se determina por los componentes de dirección o punto de horizonte (orientación del vector) y por su velocidad (magnitud del vector). Los movimientos verticales caracterizan los fenómenos atmosféricos locales, como por ejemplo la formación de nubes. Además, la formación del viento es consecuencia de la diferencia de temperaturas y calentamiento en diversas zonas del globo. (IDEAM, 2015)

Por su parte, la velocidad del viento es la encargada de determinar el desplazamiento del aire en un tiempo definido y para ello se hace uso de la Escala Beaufort (Figura 2.) la cual indica la fuerza del viento y presenta los efectos en el ambiente organizado en una escala de distintas magnitudes, permitiendo caracterizar dicho concepto en ausencia de instrumentos de medición. (IDEAM y UPME, 2017)

Figura 2. Escala de Beaufort

Escala	Nombre	kt	m/s	km/h	mph	Características para la estimación de la velocidad en la Tierra
0	Calma	1	0-0.2	1	1	Calma, el humo se eleva verticalmente.
1	Ventolina	1-3	0.3-1.5	1-5	1-3	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas.
2	Brisa muy débil	4-6	1.6-3.3	6-11	4-7	El viento se percibe en el rostro; las hojas se agitan; la veleta se mueve.
3	Brisa débil	7-10	3.4-5.4	12-19	8-12	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas.
4	Brisa moderada	11-16	5.5-7.9	20-28	13-18	El viento levanta polvo y hojitas de papel, ramitas agitadas.
5	Brisa fresca	17-21	8.0-10.7	29-38	19-24	Los arbustos con hoja se balancean; se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques).
6	Viento fresco	22-27	10.8-13.8	39-49	25-31	Las grandes ramas se agitan; los hilos telegráficos silban; el uso del paraguas se hace difícil.
7	Viento fuerte	28-33	13.9-17.1	50-61	32-38	Los árboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento es penosa.
8	Viento duro	34-40	17.2-20.7	62-74	39-46	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra el viento.
9	Viento muy duro	41-47	20.8-24.4	75-88	47-54	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados).
10	Temporal	48-55	24.5-28.4	89-102	55-63	Raro en los continentes, árboles arrancados, importantes daños en las viviendas.
11	Borrasca	56-63	28.5-32.6	103-117	64-72	Observado muy raramente, acompañado de extensos destrozos.
12	Huracán	≥64	≥ 32.7	≥118	≥73	Estragos graves y extensos.

Fuente: Retallack, 1973.

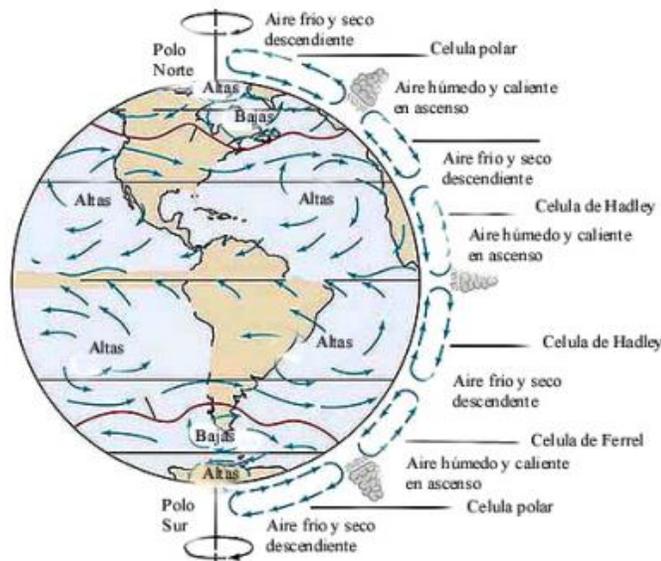
Por otro lado, y refiriéndonos a alcances más amplios, cabe mencionar que los vientos que provienen del noreste y del sudeste en esta zona tropical entre los cinturones de altas presiones subtropicales y las bajas presiones ecuatoriales, se denominan vientos Alisios. En el hemisferio norte, el aire dirigido hacia el Ecuador, es desviado a la derecha como consecuencia de la fuerza del efecto Coriolis generado por la rotación terrestre en torno al eje que pasa por sus polos, de modo que se forman los Alisios del noreste, de igual forma que ocurre en el hemisferio sur con los Alisios del sureste que son producto de la desviación del aire a la izquierda del Ecuador (CIOH, 2010).

Dichos vientos son constantes e influyen en la temperatura y humedad del territorio generalmente entre los 0 y 1500 metros, además soplan sobre la mitad del globo terráqueo a una velocidad media de 20 Km/h (Affholder y Valiron, 2001). Los vientos Alisios representan la rama de superficie de la celda de circulación de Hadley para cada hemisferio (Figura 3.). Estos vientos condicionan los regímenes de lluvia en islas montañosas y bordes orientales de los continentes (Terra, et al, 2011). Cabe resaltar que la Celda

Hadley se desarrolla desde la zona ecuatorial hasta latitudes medias ($0^\circ - 30^\circ$) y es simétrico hacia ambos hemisferios con origen en dicha ubicación (Ruíz; Serna; Zapata, 2017).

Al ocurrir el encuentro entre los vientos Alisios, el aire cálido y húmedo del Ecuador se ve forzado a elevarse, en la dirección de la rama ascendente de la celda de Hadley. Dicho movimiento suscita un enfriamiento del aire por expansión, de modo que favorece la condensación, trayendo como consecuencia el desarrollo de nubes. (CIOH, 2010).

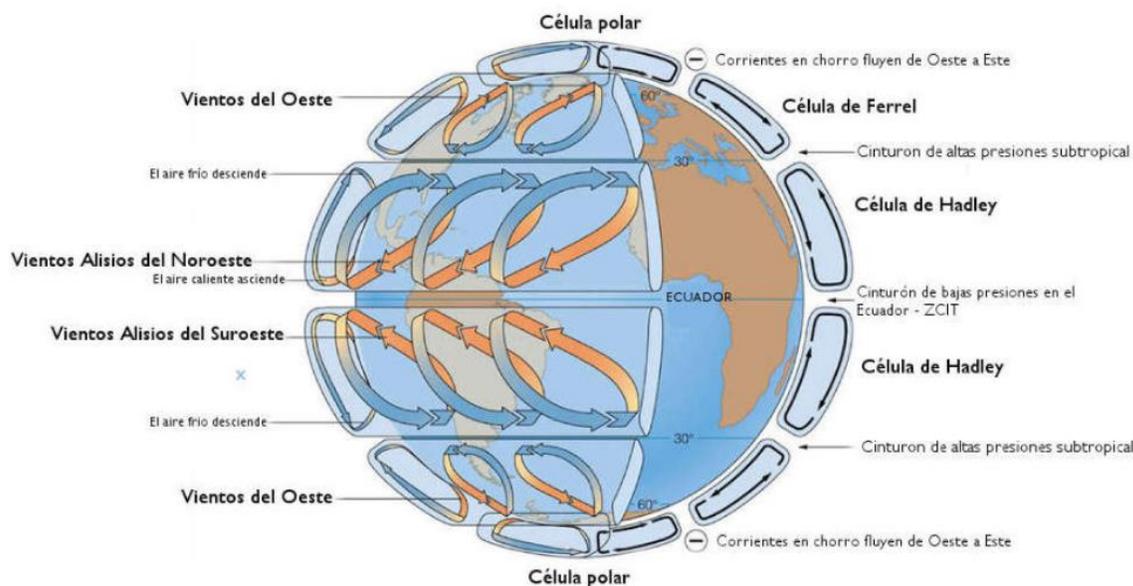
Figura 3. Distribución de los vientos globales



Fuente: Ministerio de Educación España. (s.f.) Ilustración de las células de convección atmosférica y dinámicas de vientos global. Tomado de http://blog.educalab.es/leer.es/WEB_MemoriadelosVientos/16circulacion.html.

Cuando el aire del Ecuador se calienta, asciende alcanzando los 30° de latitud en los dos hemisferios y es sustituido por el aire más próximo a los polos. El desplazamiento de las masas de aire no se extiende hacia dicho lugar ya que la rotación de la Tierra y el consecuente efecto Coriolis modifican las trayectorias del viento. Por su parte, entre los 30° y 60° de latitud norte y sur se encuentran ubicadas las celdas de Ferrel las cuales se conforman por el flujo ascendente de la celda Polar y descendente de la celda de Hadley (Figura 4.). En las celdas polares (alrededor de los 60° de latitud) se calienta el aire y asciende, formando una celda de circulación con el flujo de retorno al polo tal y como se puede apreciar en la Figura 3 (Ruíz; Serna; Zapata, 2017).

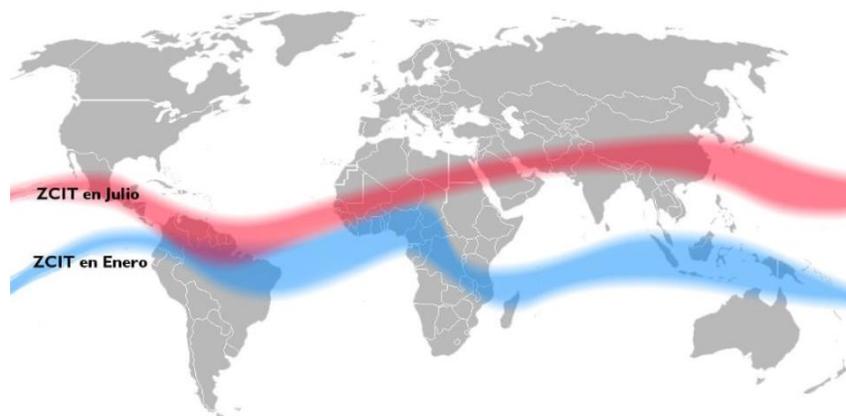
Figura 4. Células de convección atmosférica



Fuente: Náutica formación (s.f.). Ilustración de las células de convección atmosférica (Celda Hadley, Ferrel, polar).

La Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) se refiere a una estrecha banda zonal de vigorosa convección, que se manifiesta con la formación de cúmulos evidenciados en imágenes satelitales marcando la convergencia de los vientos Alisios provenientes del hemisferio Norte, originados por el anticiclón del Atlántico Norte, y el hemisferio Sur vientos derivados de los anticiclones del Pacífico y Atlántico Sur, la cual oscila de norte a sur siguiendo la posición del sol y los flujos que atraviesan el Ecuador. La penetración de este aire depende de la época del año y de la localización de este en el Pacífico. Debido al flujo convergente, la ZCIT es la zona de máxima nubosidad y lluvia (CCCP, 2002; Guzmán, Ruíz, y Cadena, 2014). La ZCIT en Colombia normalmente es discontinua sobre los Andes y bajo esta circunstancia se divide convencionalmente en dos ramas, ésta varía su posición meridional sobre el país entre los 2-10 grados de latitud norte dependiendo de la época del año (Figura 5.), cuyo proceso ondulatorio tiene influencia sobre la precipitación del territorio colombiano, debido a las magnitudes asociadas a la cercanía de esta zona. (Pabón, et al., 2001; Guzmán, Ruíz, y Cadena, 2014).

Figura 5. Posición media de la ZCIT para los periodos enero y julio.



Fuente: Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH (2010) Ilustración de la posición media de la ZCIT para los periodos enero y julio.

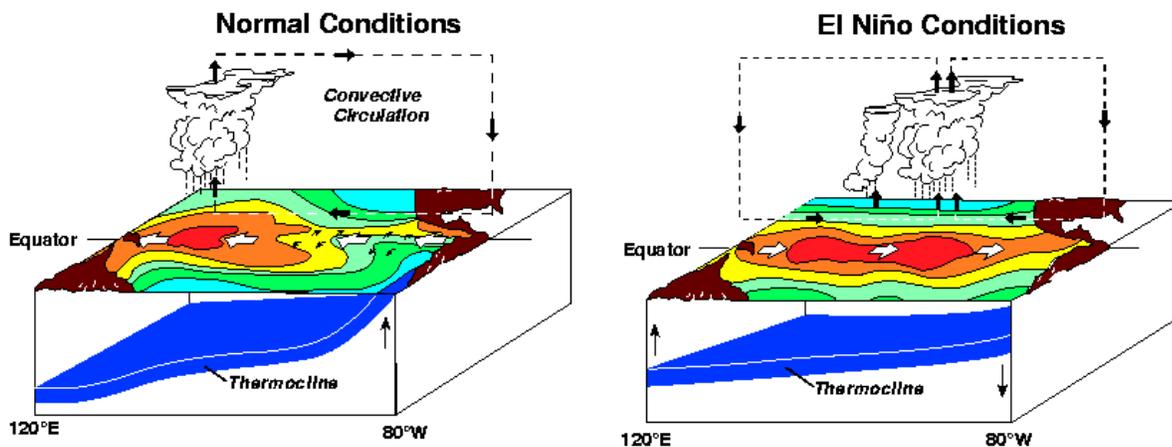
El centro de acción dominante de Colombia (ZCIT) presenta características diferentes de acuerdo a la altura de las diferentes regiones del país (N.A., 2007). El clima a lo largo del año suele contar con una estación húmeda y otra seca en todo el país, que se ven afectadas por los fenómenos de El Niño y La Niña. El ciclo conocido como los fenómenos de El Niño y La Niña es causado por la variabilidad climática en la franja tropical donde se encuentra Colombia. Estas alteraciones de la estructura térmica se asocian al debilitamiento de los vientos alisios del este y el desplazamiento del núcleo de convección profunda del oeste (IDEAM, 2007). Durante el año se registran valores de variabilidad climática (temperatura, precipitación, etc.) por encima y por debajo de lo normal, debido a este fenómeno. Mediante el análisis de información histórica, Montealegre y Pabón (2002) establecen que la afectación del régimen de lluvias por el fenómeno no sigue un patrón común; identificaron que cuando se presenta el fenómeno de El Niño, hay déficit en los volúmenes de precipitación en las regiones Andina, Pacífica y Caribe. Este efecto climático afecta la oferta natural de agua.

Según el IDEAM (2017), el viento es el movimiento natural del aire, causado por las diferencias de presión que se desarrollan por el calentamiento radiactivo diferencial de la superficie terrestre. Es una magnitud vectorial caracterizada por tener velocidad, dirección y un desplazamiento determinado por la acción de diferentes fuerzas. Con el fin de alcanzar un balance atmosférico entre las diferencias de presión, el aire fluye generalmente, desde los centros de alta a los de baja presión, presentando variaciones significativas en el tiempo y en el espacio (IDEAM, s.f.).

En Colombia, que se encuentra geográficamente ubicada entre el trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio, se presentan los vientos alisios, que soplan al noreste en el hemisferio norte y del sureste por el hemisferio sur (Cárdenas, 2015). El efecto Coriolis, por la proximidad de Colombia al Ecuador, tiene poca fuerza, es por esto que los vientos se ven influenciados por las condiciones locales y el contacto con la cordillera de los Andes que se extiende longitudinalmente a lo largo del territorio nacional en diferentes elevaciones (IDEAM, s.f.). Los vientos Alisios soplan en casi todas las regiones tropicales que se extienden entre los cinturones de altas presiones subtropicales y las bajas presiones ecuatoriales (CIOH, 2010).

Eventos del fenómeno ENSO – El Niño Y Niña. Durante períodos donde se presenta el fenómeno del niño, los vientos Alisios se alejan del Pacífico central y occidental, lo que lleva a un aplanamiento de la termoclina en el Pacífico oriental y una elevación de esta en el oeste. Este movimiento en el océano reduce la eficiencia del afloramiento para enfriar la superficie del agua. El desplazamiento de la termoclina produce cambios en la circulación atmosférica global (Figura 6.), lo que a su vez no solo provoca cambios climáticos en el trópico, sino también en regiones muy alejadas del Pacífico tropical (NOAA, 2018).

Figura 6. Representación esquemática de las condiciones océano-atmosféricas del Pacífico tropical, durante los períodos normales y de ocurrencia de los fenómenos El Niño.



Fuente: NOAA/PMEL/TAO Project, USA.

El fenómeno de El Niño es causante de efectos notables al norte de la región pacífica, en la región andina y caribe. El fenómeno de La Niña, por su lado, en Colombia se caracteriza por un gran aumento de las precipitaciones, y una disminución de la temperatura en las regiones mencionadas anteriormente, así como en las áreas del piedemonte de los llanos orientales, mientras que en la zona oriental (Orinoquía y Amazonía), la precipitación y la temperatura se mantienen normales (SIAC, 2019).

Como se mencionó anteriormente, la posición geográfica de Colombia, localizada en la Zona de Convergencia Intertropical, se encuentra influenciada por los vientos Alisios, los cuales se transportan en direcciones Noreste en el hemisferio norte y en el Sureste en el hemisferio sur (IDEAM, s.f.) A partir de estudios realizados por el IDEAM (2017), se demostró que en Bogotá la dirección del viento presenta una componente proveniente sur en la capa de 300 hPa a 200 hPa en el periodo comprendido entre noviembre y abril, mientras que para el resto del periodo el flujo de aire proviene del este. La velocidad promedio del viento por hora en Bogotá experimenta una leve variación estacional en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 3.7 meses, del 1 de junio al 22 de septiembre, con velocidades de viento promedio de más de 3.7 millas por hora. La época más tranquila del año dura 8.3 meses, del 22 de septiembre al 1 de junio (Weather Spark, 2018).

8.3 Antecedentes (estado del arte)

El tema de las cuencas atmosféricas está en sus primeras etapas de desarrollo. Como aproximación a su entendimiento fueron seleccionados documentos, tesis, artículos científicos, informes oficiales y publicaciones de índole nacional e internacional relacionadas con las temáticas de modelamiento de trayectorias de masas de aire en el ámbito de las cuencas atmosféricas, contaminación del aire en Bogotá y más específicamente Puente Aranda, calidad del aire relacionada con la salud y planificación territorial como herramienta de organización y toma de decisiones para un espacio.

La búsqueda se realizó desde el año 1995 en adelante, procurando buscar estudios relacionados al estudio de cuencas atmosféricas alrededor del mundo. Los países donde mayor incidencia de investigaciones se encontró fueron Estados Unidos, China, España y Taiwán, con un enfoque de construcción y desarrollo de territorios en función de la calidad del aire. En América latina destaca México como uno de los principales precursores en el uso de la metodología HYSPLIT, de modo que se manifiesta la relación con el tema de las cuencas atmosféricas de modo que sirva para dar diagnósticos y dar una respuesta a modo de control para los contaminantes atmosféricos. Todo lo anterior a la luz de la planificación territorial urbana, con el fin de establecer una organización y gestión ambiental del lugar. A nivel nacional e internacional la búsqueda se enfocó también en términos de salud pública de modo que se pueda establecer cómo en análisis de trayectorias de masas de aire por cualquier modelo y el uso de variables ambientales afecta a la calidad de vida de las personas en el sentido de ser los mayores causantes de enfermedades en la población.

Tabla 1. Documentos elegidos para desarrollo del estado del arte

Temática	País	Título trabajo	Autor/es	Año de publicación
Cuencas atmosféricas	México	Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso.	(García Reynoso, J, Ruiz Suárez, L, García Escalante, S & Reséndiz Juárez, S. 2009)	2009
	México	Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México	(Centro de Ciencias de la atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México, 2016)	2016
	Taiwán	Delineation of air-quality basins utilizing multivariate statistical methods in Taiwan	(Tai-YiYu Len-Fu W.Chang, 2001)	2001
	Estados Unidos	Modeling PM10 Originating from Dust Intrusions in the Southern Iberian Peninsula Using HYSPLIT	(Stein, A. F. Draxler, R.R. Castell, N. Y. Wang, J. De la Rosa, J &	2010

Temática	País	Título trabajo	Autor/es	Año de publicación
Modelo HYSPLIT			Sánchez de la Campa, A. M. 2010)	
	Estados Unidos	NOAA'S HYSPLIT Atmospheric transport and dispersion modeling system	(Stein, A. F. Draxler, R. R. Rolph, G.D, Stunder, B, Cohen, M and Ngan, F. 2015)	2010
	Estados Unidos	An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of PM2.5 source regions over the Mississippi Gulf Coast region	(Yerramilli, A. Bhaskar Rao Dodla, V. Srinivas Challa, V, 2011)	2011
	Pakistán	Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model	(Alam, K. Qureshi, S. Blaschke, T. 2011)	2011
	África	Global sand and dust storms in 2008. Observation and HYSPLIT model verification	(Wang, Y, Stein, A. F. Draxler, R. R. De la Rosa, J. Draxler, R. R., 2011)	2011
	Colombia	Origen de masas de aire en cuatro ciudades de Colombia mediante el modelo HYSPLIT	(Ramírez, O 2013)	2013
Modelos meteorológicos-Planificación territorial	Colombia	Acercamiento preliminar a las cuencas atmosféricas por medio del análisis de trayectorias de masas de aire como herramienta para la planificación territorial en el Valle de Sogamoso, Boyacá	(Camelo Olarte, D; Valbuena Chávez, L. 2017)	2017
	Colombia	Evaluación de la calidad del aire del Valle de Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (MP10), aplicando el modelo de dispersión AERMOD como herramienta de planificación	(Uribe, L & Suárez, N 2009)	2009

Temática	País	Título trabajo	Autor/es	Año de publicación
Variables ambientales - Planificación territorial	Colombia	Evaluación de la contaminación atmosférica en el aire ambiente de Manizales por COPs y pm10	(De la Paz Cortés Araújo, L. 2013)	2013
	Japón	Effects of Meteorological Conditions on PM2.5 Concentrations in Nagasaki, Japan	(Wang, J & Ogawa, S. 2015)	2015
	España	Integración de la calidad del aire en la planificación física	(Aguiló Vidal, I. 2012)	2012

Fuente: Creación propia

8.3.1 Cuencas Atmosféricas

El tema de las cuencas atmosféricas se ha abordado por varios autores alrededor del mundo, destacando México como país con un gran avance y manejo del concepto. Autores como García, et. al (2009) proponen una metodología para la identificación de cuencas atmosféricas. En su caso de estudio se empleó una modelación de calidad del aire para la identificación de la cuenca atmosférica, a través del estudio del comportamiento de varios contaminantes como NO₂, SO₂, O₃ y PM en la Zona Centro de México. Los resultados de las modelaciones de calidad del aire se compararon con dichas mediciones ambientales con el fin de determinar el nivel de acierto del modelo. Finalmente, se identificaron y presentaron un conjunto de índices ambientales como el de protección de salud y ecosistemas para especificar la extensión de la cuenca atmosférica.

De la misma forma, Martínez, et al. (2016) desarrolla un diagnóstico de la calidad del aire en cuencas atmosféricas, con base en la información disponible y visitas técnicas en la Megalópolis de dicho país. Hace referencia al intercambio de contaminantes entre cuencas a partir de las trayectorias con estudios realizados de movimiento de material particulado y su comportamiento. Con base en los estudios y la información requerida se buscó desarrollar políticas que apoyen la mejora de la calidad del aire se proponen recomendaciones y la agenda científica para la CAME.

En Taiwán se encontraron estudios similares desarrollados por Yi Yu y Chang (2001) donde se analizaron datos de series de tiempo de contaminantes del aire, O₃ y PM₁₀, por medio del uso de métodos estadísticos multivariados, el análisis conglomerado y el método de rotación Varimax, se pudo determinar la división de las cuencas de calidad del aire. El método de rotación Varimax les permitió delinear cinco subregiones PM₁₀ homogéneas que acumularon el 85.6% de la varianza total. El análisis de series de tiempo de los puntajes de los componentes rotados asociados con las subregiones de PM₁₀ reveló que todas las subregiones divididas presentaban un fuerte ciclo estacional. Cuatro de las cinco subregiones tuvieron puntuaciones de componentes más altas y altas concentraciones de PM₁₀ de noviembre a enero. Una subregión experimentó valores más altos de marzo a mayo.

El uso del enfoque Varimax y el análisis de conglomerados en el O₃ y PM₁₀, confirmó que el O₃ era más demostrativo de las cuencas de calidad del aire en Taiwán. Tanto el método de rotación Varimax como el análisis de conglomerados tienen ventajas específicas para la división de las cuencas de calidad del aire. Este estudio también propone una delineación de cinco cuencas de calidad del aire que tienen características O₃ homogéneas como una asignación alternativa de las regiones de control de la capacidad de carga atmosférica.

8.3.2 Modelo HYSPLIT

En el año 2011, Stein, et al, planteó un proyecto basado en el modelo de Trayectorias Integradas Lagrangianas Híbridas de Partícula Única (HYSPLIT) el cual se ha aplicado para calcular las distribuciones espaciales y temporales del polvo que se origina en el Norte de África. El modelo se ha configurado para pronosticar las partículas de polvo por hora (PM₁₀) concentrándose en los impactos en el sur de la Península Ibérica. Dicho modelo fue capaz de simular la ocurrencia de episodios de polvo en el Sahara como se observa en las estaciones de medición y captura los niveles generalmente más altos observados en el este de Andalucía, España, con respecto a la estación del oeste de Andalucía. Pero la simulación tiende a subestimar la magnitud de los picos de concentración de polvo.

Un acercamiento similar fue desarrollado por Wang, et al, (2011), quien aplicó el modelo HYSPLIT para simular la distribución global de polvo para 2008 utilizando dos esquemas de emisión de polvo diferentes, tomando como referente al norte de China y dos estaciones de medición de PM₁₀ en el sur de España, y los datos de una estación ubicada en el centro del desierto del Sahara. El primero supone que podrían producirse emisiones desde cualquier celda de la cuadrícula de uso de la tierra definida en el modelo como desierto. El segundo enfoque de emisión utiliza un algoritmo derivado empíricamente basado en observaciones satelitales.

En general, el modelo reproduce la frecuencia de tormenta de polvo para la mayoría de las regiones para los dos enfoques de emisión. Además, se logra un buen desempeño cuantitativo en las estaciones terrestres en el sur de España y el oeste de China cuando se utilizan las emisiones basadas en el uso del suelo en el desierto, aunque HYSPLIT sobreestima la concentración de polvo en las zonas con viento del este de Asia y subestima la columna en el centro del Sahara Desierto. Cabe destacar que los dos modelos se compararon cualitativamente con los datos satelitales, mostrando un buen acuerdo en general en la distribución espacial de la columna de polvo.

En este mismo año, Yerramilli, et al, (2011) estudió las partículas finas (PM_{2.5}), las cuales están formadas principalmente por gases precursores, como el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), que se emiten en gran parte por operaciones industriales intensas y actividades de transporte y causa graves efectos en la salud. En el presente estudio, el modelo HYSPLIT (por sus siglas en inglés) se utiliza para identificar las ubicaciones de las fuentes de emisión y las tendencias de transporte de sustancias en la atmósfera a lo largo de Estados Unidos. Los resultados arrojaron que las regiones tomadas como punto de partida son contribuyentes significativos para los valores observados de PM 2.5.

Alan, et al, (2011) usó el modelo HYSPLIT para el análisis de trayectoria con el fin de reconstruir los orígenes de las masas de aire y comprender la variabilidad espaciotemporal de las concentraciones de aerosol. Los datos recientes de MODIS en aerosol (2002–2008) y los datos anteriores de TOMS (1979–

2001) revelaron concentraciones crecientes de aerosoles en Pakistán y áreas adyacentes. Posteriormente, los análisis de trayectoria de masas indicaron que, mientras que las masas de aire de invierno que llegaron a Pakistán habían recorrido largas distancias, las masas de aire de verano sólo habían recorrido distancias cortas. Las concentraciones más altas de aerosol durante el verano se interpretaron como un resultado de que las masas de aire pasan más tiempo en tierra durante el verano que durante el invierno. Si bien la lluvia monzónica tiende a reducir las concentraciones de aerosoles al eliminar los aerosoles de la atmósfera, este efecto se limita principalmente a las partes este y sudeste de Pakistán.

Por otro lado, Ramírez, (2014) planteó como objetivo de su investigación la identificación de los orígenes de las masas de aire en cuatro ciudades colombianas (Bogotá, Cartagena de Indias, Pasto y Leticia) que tienen el potencial de afectar la calidad del aire urbano al transportar material particulado a largas distancias desde diferentes puntos geográficos. Metodológicamente se utilizó el modelo HYSPLIT con el cual se midieron retro trayectorias para un periodo de análisis de un año (desde el 01 de enero a 31 de diciembre de 2012). Las alturas consideradas fueron de 750, 1500 y 2500 m medidas desde el nivel del suelo. Según los resultados obtenidos, el origen de masas de aire más frecuente en Cartagena de Indias durante 2012 fue Caribe (45%), seguido por Continental (36%). En Bogotá fue Continental (77%), seguido por Atlántico Este (19%). En Pasto fue Pacífico (72%), seguido por Continental (23%). Y en Leticia fue Continental (99%) seguido por el origen Atlántico Este (1%).

En el año 2015, Stein, et al, estudió dicho modelo, de modo que destacó las aplicaciones recientes del sistema de modelado HYSPLIT, incluida la simulación de experimentos de liberación de trazadores atmosféricos, radionúclidos, humo originado en incendios silvestres, cenizas volcánicas, mercurio y polvo arrastrado por el viento.

8.3.3 Modelos Meteorológicos-Planificación Ambiental

La implementación del análisis de modelos meteorológicos en función de la planificación ambiental territorial de un territorio se ha trabajado por Uribe y Suárez (2009) quienes realizaron una evaluación de la calidad del aire del Valle de Sogamoso, respecto al material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), aplicando el modelo de dispersión AERMOD como herramienta de planificación. Una vez recopilada toda la información se alimentó el modelo con cada uno de los parámetros exigidos, para obtener las concentraciones de PM_{10} en la zona y determinar las áreas más afectadas. En el presente estudio, se obtuvo un error bajo para el promedio anual y considerablemente alto para los promedios diarios.

En el área afectada se encontraron dos picos:

1. El primero, se da en el Valle de Sogamoso por dos causas la primera su ubicación, y la segunda por las altas emisiones de material particulado generadas por el ACPR.
2. El segundo, se evidencia en la falda de la montaña, como consecuencia del material particulado que producen los chircales y es arrastrado. Proceso que no cuenta con ningún sistema de control puesto que es una producción artesanal.

Por ende, basado en dos premisas, la creciente preocupación de la autoridad ambiental respecto a dicha contaminación y además los resultados que nos arroja el modelo, podemos generar dos escenarios basados en la modelación que permiten dar un concepto técnico y además permiten a la autoridad ambiental tomar las decisiones pertinentes.

El resultado de esta modelación evidenció que las concentraciones de PM_{10} se pueden reducir en un 45% para promedios diarios y 39% para promedios anuales, sin embargo, la autoridad ambiental debe tomar otras medidas de control como la programación de turnos de producción. Al analizar los resultados se concluye que, con la instalación del sistema de control, se lograría una disminución del 62%, para promedios diarios, y 45%, para promedios anuales, de la concentración de PM_{10} en la zona del parque industrial. Teniendo en cuenta los datos modelados, se pudo establecer que la mejor forma de mejorar las condiciones de la calidad del aire en la zona de estudio es ejercer control tanto en la industria artesanal como en la pesada (en especial en ACPR), en conjunto.

Por su parte, Camelo y Valbuena, (2017) evaluaron en su estudio de caso un análisis de manera preliminar sobre las cuencas atmosféricas en el Valle de Sogamoso-Boyacá, mediante la modelación del comportamiento de las masas de aire. En este orden de ideas, para la conformación de cuencas atmosféricas se hizo uso de trayectorias de parcelas de aire hacia adelante con un tiempo de integración de 24 horas en los meses de febrero y abril del año 2015, en donde se tuvieron en cuenta las variables meteorológicas de viento, temperatura, precipitación y humedad relativa junto a la topografía de la zona.

Con la implementación del modelo HYSPLIT se calcularon las frecuencias de trayectorias que pasaban por la región y a partir de esta información se llevó a cabo la delimitación probable de la cuenca atmosférica. De acuerdo a la revisión meteorológica y climática de Colombia y el Valle de Sogamoso, en los periodos 1981-2010 y el año 2015, se establecieron las temporadas húmedas y secas del año, cuyas condiciones favorecen y limitan la dispersión de contaminantes atmosféricos presentes en el Valle, siendo éstos febrero y abril. Las trayectorias de masas de aire con origen en el Valle de Sogamoso evidenciaron la concentración de éstas sobre las regiones de Antioquia, Caldas, Cundinamarca y Santander, a partir del criterio de acumulación de parcelas de aire, meteorología y topografía. A partir de ello se determinó la contribución en la planificación territorial y gestión ambiental regional y el apoyo a los sistemas de monitoreo de calidad del aire.

8.3.4 Variables Ambientales-Planificación Territorial

En los trabajos consultados se realiza una integración de la calidad del aire a la planificación territorial. Cortés (2013) llevó a cabo el análisis de datos registrados de PM_{10} durante el periodo comprendido entre enero de 2010 y diciembre de 2012, donde demuestra que la dirección y velocidad del viento, la precipitación y la humedad relativa influyen en el desplazamiento y dispersión del contaminante, advierten que, en la ciudad de Manizales, Colombia, las industrias metalúrgicas producen la mayor parte de emisiones que afectan la calidad de vida de la población.

Durante la investigación desarrollada por Aguiló (2012), se realiza un modelo de integración de variables territoriales que afectan la calidad del aire de la ciudad de Madrid, España. Este proyecto tiene como propósito la integración del concepto de calidad del aire en la toma de decisiones en la planificación territorial a partir de una aproximación geoestadística para analizar y predecir los valores meteorológicos asociados a la calidad del aire. Con la integración de este modelo, Aguiló propone que se reducirán tres factores clave en la planificación: incertidumbre, tiempo empleado para generar la predicción y recursos asociados a los anteriores.

En un estudio realizado en la prefectura costera de Nagasaki, Japón, Wang y Ogawa (2015) señalan que hay tres factores esenciales que tienen efecto sobre la concentración de PM_{2.5} en la prefectura: fuentes de emisiones domésticas, fuentes externas al territorio del país y las condiciones meteorológicas. En esta prefectura se estudió el transporte a larga distancia de contaminantes haciendo énfasis en el PM_{2.5}; el estudio se realizó tomando datos meteorológicos entre enero y diciembre del año 2013. Los autores determinaron que la temperatura, la precipitación y la dirección del viento influyen a lo largo del año en la acumulación de contaminantes en el área escogida.

8.4 Marco de referencia normativo

Para la realización de este estudio, se tuvieron en cuenta las siguientes normas legales vigentes aplicadas en Colombia, con el fin de analizar los parámetros establecidos relacionados a la calidad del aire y el contexto de atmósfera, para así mismo tomarlos de referencia en el desarrollo del objetivo donde se dieron pautas para la planificación territorial relacionada a los procesos atmosféricos.

Tabla 2. Marco normativo de la investigación

Normativa	Contenido Utilizado
Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de protección al Medio ambiente. 1979.	Normas de calidad del aire y métodos de medición y selección del sitio de muestreo para la determinación y localización de chimeneas y fuentes fijas artificiales.
Decreto 948 de 1995	Establece normas y principios generales para la protección atmosférica, normas básicas para la fijación de estándares mínimos de emisión y descarga de contaminantes a la atmósfera y mecanismos de prevención y control de contaminación del aire.
Decreto 979 de 2006	En relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. Medidas de atención de episodios de contaminación y planes de contingencia por contaminación atmosférica.
Resolución 601 de 2006	Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química.
Resolución 909 de 2008	Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. (Concentraciones de mg/m ³ y Tasa de emisión en g/s). Estándares de emisión admisibles de contaminantes para fuentes fijas y equipos de combustión externa.
Resolución 2154 de 2010	Establece directrices y metodologías para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en el territorio nacional.
Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la norma nacional de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Norma nacional de Calidad del Aire.

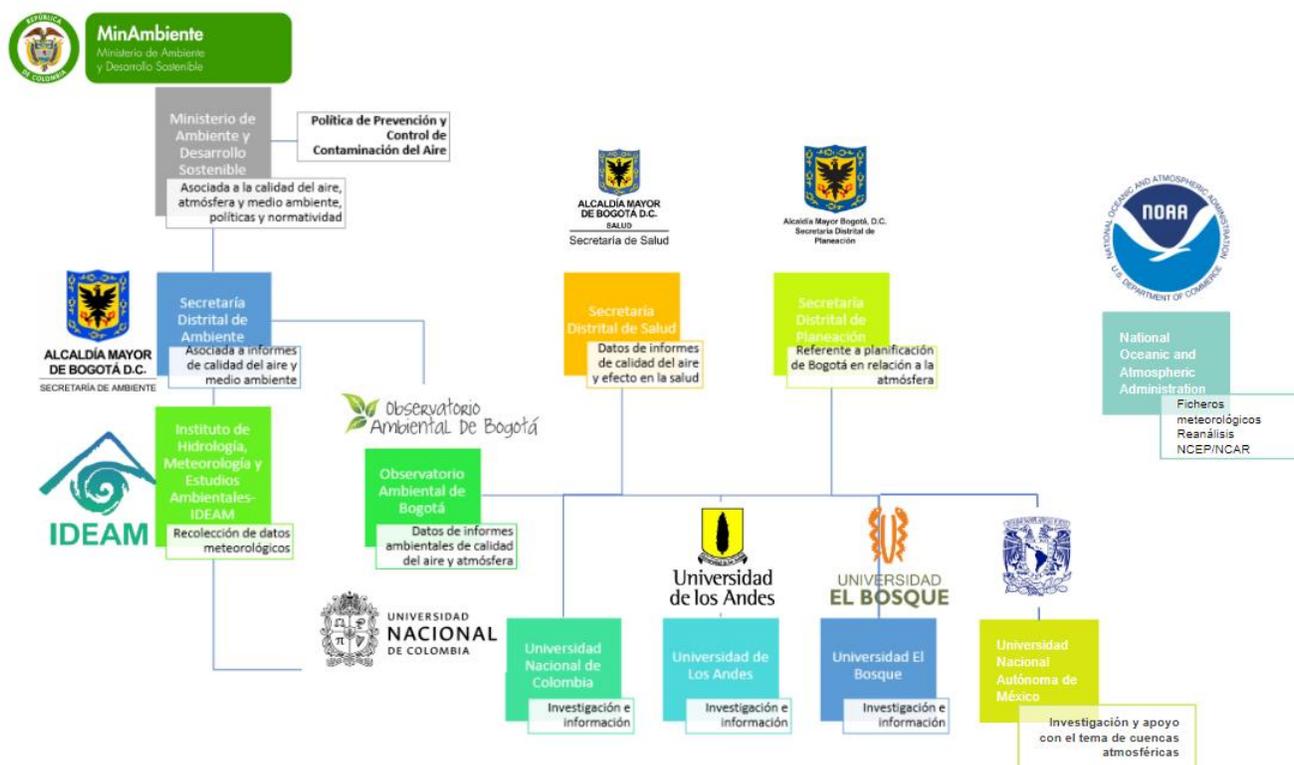
Conpes 3344 de 2005	Contiene los lineamientos para la formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire y recomienda adoptar los lineamientos propuestos para el desarrollo de estrategias de prevención y control de la contaminación del aire
Protocolo de Montreal (1987)	Relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.
Convenio de Ginebra (1979)	Sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia.
Política de Prevención y Control de Contaminación del Aire	Busca impulsar la gestión de la calidad del aire con el fin de alcanzar el bienestar humano en el marco del desarrollo sostenible.

Fuente: Creación Propia

8.5 Marco institucional

Para el desarrollo del presente trabajo, se tomaron como línea base instituciones distritales que realicen gestión de los siguientes aspectos, dentro de la ciudad de Bogotá y que por la naturaleza de esta investigación, tengan que ver con: redes meteorológicas y climatológicas de la ciudad, normatividad, secretaria de salud, observatorios ambientales, planeación del territorio y políticas públicas de calidad del aire. (Organigrama de cómo está organizada la gestión sobre el aire y la atmósfera en Bogotá).

Figura 7. Organigrama de la gestión sobre el aire y la atmósfera en Bogotá



Fuente: Creación Propia

9. Metodología

9.1 Metodología de la investigación y diseño metodológico

9.1.1 Enfoque y alcance de la investigación

El proyecto realizado tuvo un enfoque mixto, ya que por un lado se realizó recolección de datos tomados de la red de monitoreo de la calidad del aire para posteriormente realizar un análisis de la influencia de las emisiones producidas en Puente Aranda en la salud por medio de la comparación de los resultados con la normatividad reglamentaria vigente. Por otro lado, se realizó el análisis de trayectorias utilizando la modelación del programa HYSPLIT, a partir de las características que muestran los mapas realizados, se correlaciona la contaminación transportada por las masas de aire con la planificación y las alternativas que se pueden plantear para futura redacción de la misma en la prevención de la salud de los ciudadanos del país.

En cuanto al alcance del estudio, este es de tipo exploratorio ya que, si bien el tema de calidad del aire se ha estudiado medianamente, no se han realizado proyectos que busquen interpretar la situación de trayectorias del aire a nivel atmosférico abordados desde esta perspectiva y con la aplicación de dicho modelo meteorológico, se va a informar de la problemática y dar aportes para el ordenamiento territorial. Por otra parte, también se puede considerar descriptivo puesto a que en este texto se encuentran especificadas las propiedades y características que componen la alteración y movimiento de una cuenca atmosférica, además de los resultados que explican cómo fue elaborada durante el desarrollo del estudio. Además, el alcance, también es de tipo correlacional, puesto que se evalúan variables meteorológicas como magnitud y velocidad del viento; temperatura; precipitación y humedad relativa; factor de tiempo y altura de elevación del terreno y su relación con la contaminación del aire y atmósfera, a través del análisis de las trayectorias de masas de aire a alturas sobre el nivel del suelo (ARGL) determinadas.

9.1.2 Hipótesis de investigación

Las trayectorias de masas de aire, que configuran la cuenca atmosférica con origen en la localidad de Puente Aranda, cubren espacios biogeográficos macro regionales, conduciendo sustancias con altos índices de material particulado y otros contaminantes, los cuales generan riesgos de diversas magnitudes y tiempos por determinar sobre la salud de la población que cubre dicha cuenca atmosférica.

9.1.3 Hipótesis nula

Las trayectorias de masas de aire, que configuran la cuenca atmosférica con origen en la localidad de Puente Aranda no cubren espacios biogeográficos macro regionales y tampoco conducen sustancias con altos índices de material particulado y otros contaminantes, los cuales no generan riesgos de diversas magnitudes y tiempos por determinar sobre la salud de la población que cubre dicha cuenca atmosférica.

9.1.4 Hipótesis alternativa

Los vientos alisios del Sureste que convergen en Colombia, y por ende en Puente Aranda, Bogotá, dirigen sus corrientes en dirección de los Cerros Orientales, lo cual provoca que se transporten los contaminantes de otros lugares y se asienten en dicha localidad.

9.1.5 Unidad de análisis

En el presente proyecto la unidad de análisis es el comportamiento típico de las trayectorias de masas de aire que permiten identificar una cuenca atmosférica con origen en la localidad de Puente Aranda, Bogotá, mediante la investigación de las dinámicas atmosféricas.

9.1.6 Muestra y población (cuantitativo)

Con el fin de determinar las características meteorológicas relacionadas con la climatología en Colombia, se tomó un periodo de 10 años (2009-2018) para lograr caracterizar la climatología para el año 2019. Basándonos en el método implementado por Camelo Olarte, D y Valbuena Chávez, L (2017), se descargó la información pertinente de las bases de datos de Reanálisis en la página web de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Era-interim, datos de TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) y Earth Nullschool por medio de las cuales se obtuvieron los datos exactos de temperatura, precipitación, humedad relativa y vientos. Para obtener los datos correspondientes a la rosa de vientos se consultó la página web Meteoblue. Dichos datos se presentan en superficie de 10 m (0.995sigma), resolución de 2.5° para mayor detalle en la imagen resultante y niveles de presión 300, 500, 600, 700 y 925 Hectopascales (hPa), lo anterior se realiza en especial para aquellos que se manejan de líneas de corriente, magnitud y dirección del viento. Posteriormente se comienza la construcción de gráficas con las respectivas variables recolectadas junto al análisis de estas para cada periodo de tiempo tomado.

Para el sector de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá se obtuvieron los datos de estaciones meteorológicas de las variables de vientos, temperatura, humedad relativa y precipitación de los periodos 2009-2018 y el año 2019, así como valores de calidad del aire con ayuda de la información brindada por las estaciones de Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB operada por la Secretaria Distrital de Ambiente para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y CO. La estación específicamente estudiada presenta un carácter de monitoreo mixto. La interpretación de los anteriores datos permitió la caracterización climatológica además de manifestar los episodios críticos de contaminación a lo largo del año de estudio (2019).

9.1.7 Variables, aspectos e indicadores

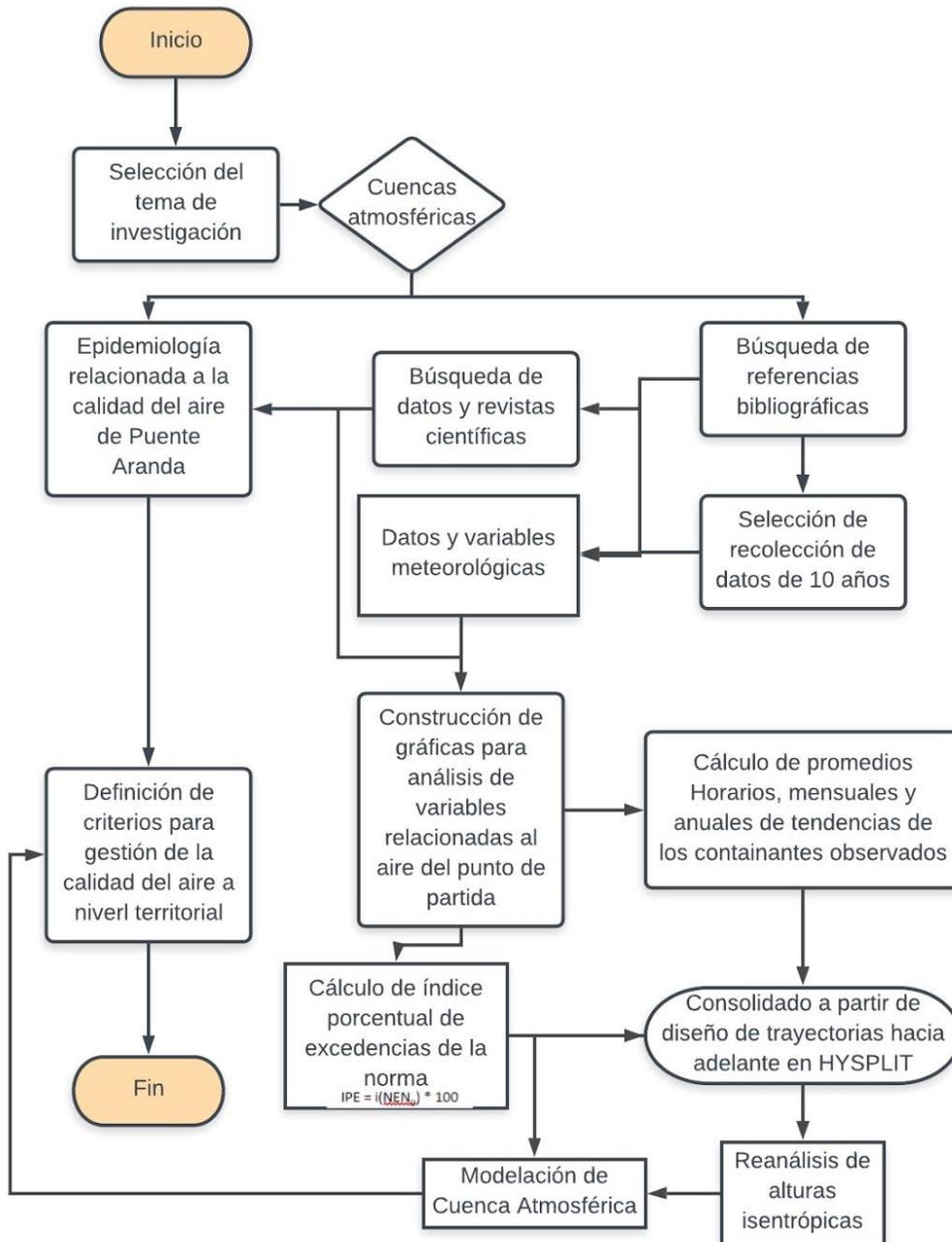
Tabla 3. Variables y aspectos de la investigación

Dimensión	Variable	Aspecto de la variable
Ecológica	<ul style="list-style-type: none">• Variables meteorológicas• Parcelas de aire	<ul style="list-style-type: none">• Atmósfera
Social	<ul style="list-style-type: none">• Población afectada por la contaminación atmosférica y del aire	<ul style="list-style-type: none">• Demográfico
Territorial	<ul style="list-style-type: none">• Regiones afectadas	<ul style="list-style-type: none">• Área de influencia

Fuente: Creación Propia

A continuación, se presenta el esquema donde se recopila lo explicado anteriormente y se plantea el proceso de la investigación.

Figura 8. Flujograma del proceso de investigación



Fuente: Creación Propia

9.2 Metodología por objetivos

9.2.1 Objetivo 1. Analizar las características meteorológicas y climáticas presentes en la Ciudad de Bogotá, Colombia en el Sector de Puente Aranda.

Para observar el comportamiento y las tendencias de los diferentes contaminantes, a partir de la información secundaria proveniente de las entidades competentes, se calcularon promedios horarios,

diarios, mensuales y anuales, y se generaron series de tiempo para agrupar y evaluar los datos obtenidos. Los resultados fueron comparados con parámetros de calidad del aire de legislación tanto nacional como internacional. Por su parte, para cuantificar el grado de contaminación atmosférica para toda Bogotá, se definió el índice porcentual de excedencias de la norma (IPE) para el sector de Puente Aranda, comparándolo con la norma actual para material particulado (norma de exposición prolongada), de acuerdo a la ecuación (1). NE es el número de veces en el que el promedio horario/diario excede la norma usada como referencia y ND es el número total de datos disponibles para cada una de las estaciones (i) de la red. (Gaitán, M. 2007)

$$IPE = i (NE * ND) * 100$$

9.2.2 Objetivo 2. Conocer de manera preliminar las cuencas atmosféricas del Sector de Puente Aranda (Bogotá, Colombia) y las localidades en la periferia, mediante la modelación (HYSPLIT) del comportamiento de las masas de aire.

Para establecer el origen de las masas de aire fue consolidado el análisis a partir de trayectorias hacia adelante, haciendo uso del modelo HYSPLIT (The Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) en el sector de Puente Aranda, con la selección de ciertos meses del periodo de tiempo de muestra. La selección se realizó de acuerdo al cambio de temperatura y el aumento y disminución de precipitación más severos, para comparar paralelamente con un mes en el cual estos factores meteorológicos no demostraron ningún cambio; es por esto que los meses seleccionados son diciembre del 2010 para el fenómeno La Niña, diciembre del 2015 para el fenómeno El Niño y junio de 2016. Los parámetros de entrada al modelo se establecieron bajo la organización de los siguientes datos: ficheros meteorológicos en formato ARL de NCEP/NCAR Reanálisis, alturas de 500 m (incidencia de la contaminación a nivel local), 750 m (referencia de incidencia dentro de la capa límite por emisiones antropogénicas) y 1.000 m (comportamiento de las masas de aire en la zona superior de la capa límite) medidas desde el nivel del suelo. Se revisó de igual forma la capa de mezcla y la duración de las trayectorias por 30 días para conocer el desplazamiento de las masas de aire con tiempo de integración de 24 horas con intervalos de 6 horas UTC (Tiempo Universal Coordinado), representando el transporte de los cinco días anteriores (120 h). Lo anterior permite conocer el desplazamiento de las masas de aire con un origen sinóptico. (Ramírez Hernández, O, 2017). Finalmente se utiliza la técnica estadística de clúster al establecer 5 o 7 grupos de clústeres, por medio de la siembra de parcelas de aire en grandes centros urbanos e industriales como es la localidad de Puente Aranda, en zona comercial, residencial e industrial para conocer los patrones de circulación de las masas de aire (Camelo Olarte, D y Valbuena Chávez, L, 2017).

9.2.3 Objetivo 3. Proponer estrategias de planificación para el ordenamiento territorial con base en el modelamiento de la cuenca atmosférica a partir de Puente Aranda.

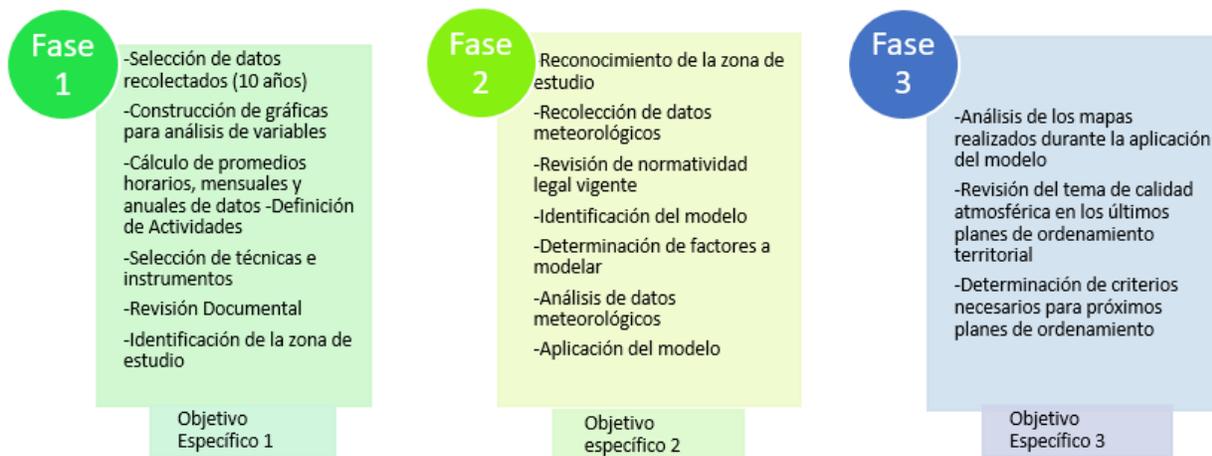
Una vez determinada la trayectoria y la zona afectada por la contaminación procedente de Puente Aranda, se procedió a describir las estrategias formuladas por la Secretaria Distrital de Ambiente y la Secretaria Distrital de Salud, con el fin de mejorar el índice de calidad del aire de Bogotá. Para ello, se estableció en un esquema, la actuación que cada una de las entidades distritales realiza junto con la normatividad

ambiental vigente relacionada al tema de emisiones atmosféricas, para evaluar su relación con la Política de Salud Ambiental. (Pereira, A. 2017).

Buscando definir las medidas de control que beneficien el ordenamiento territorial, se proponen criterios para la gestión adecuada del territorio, con ayuda de un análisis de escenarios que permita la mejora de la calidad del aire, así como la integración de elementos naturales (áreas de preservación y conservación), las amenazas y riesgos referentes a la contaminación y la conformación de una unidad de gestión regional a partir de la delimitación de la cuenca atmosférica. El documento final es la recopilación y análisis de todos los resultados concretos documentados.

9.3 Plan de trabajo

Figura 9. Plan de trabajo por fases



Fuente: Creación Propia

Tabla 4. Técnicas e instrumentos de recolección y sistematización de datos

Objetivo General	Objetivos específicos	Actividades	Técnicas	Instrumentos	Resultados esperados
Determinar cómo puede afectarse el ordenamiento territorial regional por el transporte de contaminantes generados en el sector de Puente Aranda, Bogotá a través de la herramienta de modelación de las cuencas atmosféricas.	Analizar las características meteorológicas y climáticas presentes en la Ciudad de Bogotá, Colombia en el Sector de Puente Aranda y sus consecuencias sobre la salud de la población.	Revisión bibliográfica	Análisis documental	Artículos científicos, informes, tesis de pregrados y posgrados.	Documentación expresa representando la climatología relacionada a la dirección y velocidad del viento, temperatura, precipitación y humedad relativa del país en los 10 años seleccionados, teniendo en cuenta los periodos constituidos por el 2010-2011 y 2014-2015 en los cuales se presenta el fenómeno ENSO.
		Inspección de datos meteorológicos y climáticos de Bogotá	Análisis de datos meteorológicos	Reportes meteorológicos y bases de datos por estaciones	
		Revisión normativa	Análisis documental	Leyes, Resoluciones y decretos vigentes y estándares de la OMS	
		Recolección y análisis de datos relacionados a la contaminación	Análisis estadístico y comparación de teoría con resultados	Reportes meteorológicos y bases de datos por estaciones	
		Consulta de las implicaciones epidemiológicas	Análisis documental	Indicadores de Secretaría Distrital de Salud y estándares de la OMS	
	Conocer de manera preliminar las cuencas atmosféricas del Sector de Puente Aranda (Bogotá, Colombia) y las localidades en la periferia, mediante la modelación (HYSPLIT) del comportamiento de las masas de aire.	Revisión de la forma de empleo del programa HYSPLIT	Análisis documental	Manuales de uso del programa HYSPLIT	Representación en mapas de las trayectorias de masas de aire en el periodo seleccionado, y establecimiento de cuenca atmosférica con punto de partida Puente Aranda
		Selección de los periodos de tiempo a trabajar en la realización del modelo	Análisis de datos documentados de los patrones del fenómeno ENSO	Artículos científicos, informes, tesis de pregrados y posgrados.	
		Definir los tipos de trayectorias que se realizan con sus respectivos parámetros	Análisis documental de los parámetros	Artículos científicos, informes, tesis de pregrados y posgrados.	
		Siembra de parcelas de aire para reconocer la trayectoria del viento	Simulación de trayectorias	Programa HYSPLIT	
		Construcción de la cuenca atmosférica	Clusterización de trayectorias	Programa HYSPLIT	
		Análisis de los resultados	Radiografía textual	Informe	
	Proponer estrategias de planificación para el ordenamiento territorial con base en el modelamiento de la cuenca atmosférica a partir de Puente Aranda.	Revisión documental	Análisis documental	Artículos científicos, informes, tesis de pregrados y posgrados.	Descripción del aporte de la metodología aplicada en el apoyo a la planificación del ordenamiento territorial.
		Planteamiento del potencial de las cuencas atmosféricas como herramienta de prevención para la calidad del aire	Radiografía textual	Informe	
		Expresar la dirección de desplazamiento de las masas de aire que contienen contaminantes y las regiones que se ven afectadas	Radiografía textual	Informe	

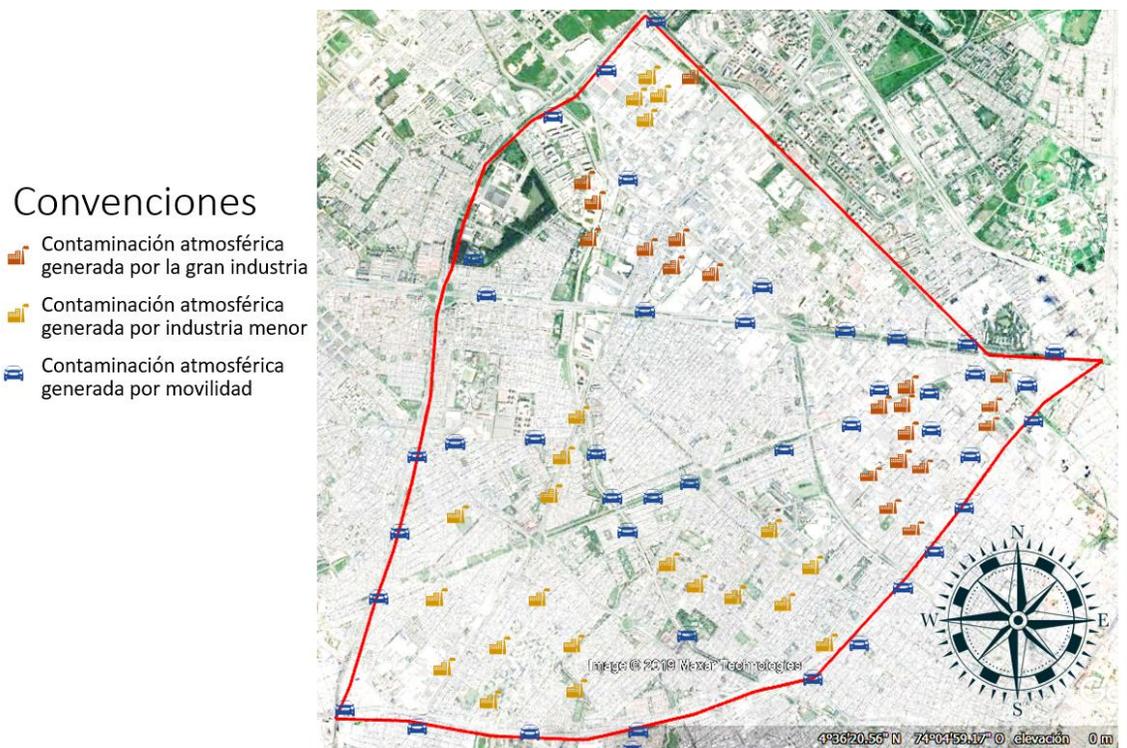
Fuente: Creación Propia

10. Resultados y análisis

10.1 Reconocimiento de la zona de estudio y el territorio

Como resultado del desarrollo de Bogotá a lo largo de los años, Puente Aranda se convirtió en la localidad de mayor concentración industrial siendo principal sede de industrias manufactureras que crecieron a la par con el sector residencial (Figura 10.). De hecho, es considerado uno de los principales complejos urbanos - industriales de Colombia. Para el año 2007, en la localidad se encontraban alrededor de 14.140 empresas equivalentes al 6,2% de toda la ciudad. La estructura empresarial de la localidad se concentraba en el sector servicios (69%) y la industria (26%) (Cámara de Comercio de Bogotá, 2007).

Figura 10. Mapa de zona de estudio: ubicación del corredor industrial con las principales fuentes fijas y móviles de la localidad de Puente Aranda.



Con una extensión de 1.731 ha, Puente Aranda cuenta con un terreno clasificado como urbano (Alcaldía Local de Puente Aranda, 2012). Las principales UPZ se pueden apreciar en el cuadro X donde se especifica su vocación predominante. Destacan la UPZ Zona Industrial y Puente Aranda como foco de la mayor presencia de fuentes fijas y móviles, a pesar de que en las demás también se tienen registros de estos. (Anexos 1 a 4). La UPZ Zona Industrial resalta por tener algunos desarrollos residenciales con presencia de actividades productivas en los barrios Cundinamarca y Pensilvania ubicados sobre la avenida Ciudad de Quito o avenida carrera 30.

Por su parte la UPZ Puente Aranda presenta tres actividades principales; la primera de carácter industrial con algunos elementos dotacionales como el Batallón Caldas, la segunda, residencial con actividad económica, en los barrios Puente Aranda y Salazar Gómez, en predios ubicados frente a las avenidas del Congreso Eucarístico o Carrera 68 y la Avenida Centenario (calle 13) y la tercera, localizada sobre la Avenida de las Américas (barrio Industrial - Zona de outlets) y la Avenida Centenario (barrio Los Ejidos, San Andresito de la 38) con presencia de actividad comercial (Cámara de Comercio de Bogotá, 2007).

Figura 11. Comparativo de UPZ de Puente Aranda

UPZ	Clase	No. de barrios	Estrato	Estado
Ciudad Montes	Residencial consolidado	18	3	Reglamentada
Muzú	Residencial consolidado	11	3	Reglamentada
San Rafael	Residencial consolidado	14	3	Reglamentada
Zona Industrial	Industrial	7	0, 2 y 3	Reglamentada
Puente Aranda	Industrial	5	0 y 3	Reglamentada

Fuente: DAPD. POT. Decreto 190 de 2004. DAPD, Bogotá. DAPD (2006) “UPZ reglamentadas”. Disponible en: www.dapd.gov.co

Proceso: Dirección de Estudios e Investigaciones de la CCB

En los últimos diez años se ha evidenciado una dinámica de cierre de varias fábricas e industrias las cuales no cumplen del todo con la normativa establecida. En el año 2008, se realizaron visitas a 1.100 fábricas de las cuales 762 eran grandes generadoras de contaminación atmosférica de acuerdo a Juan Antonio Nieto, Secretario Distrital de Ambiente de dicho periodo (El Tiempo, 2008). Sumado a ello, tan solo para el año 2012, cerca del 32% de dichos establecimientos cumplían con las normas ambientales. La Secretaria Distrital de Ambiente encontró chimeneas con alturas de menos de 15 metros en fábricas, los cuales están por debajo de la altura exigida. El punto más crítico evidenciado al momento fue la avenida 6a., entre carreras 30 y 34 (El Espectador, 2012). En el año 2018 se cerraron 4 empresas dedicadas a la fabricación de dulces y bocadillos, una empresa tostadora de café, una tintorería y un establecimiento dedicado a la fundición de aluminio dentro de la localidad por incumplimientos normativos con respecto a la calidad del aire. (Sabogal, 2018).

Las implicaciones regionales por las dinámicas de flujos de aire pueden transportar contaminación a diversas zonas del país. Adicionalmente, la localidad, al estar ubicada en el centro del territorio de Colombia, puede dirigir las trayectorias de vientos que la atraviesan hasta tener acceso a diversas regiones contiguas. El transporte de las masas de aire depende de las distancias probables de transporte de la contaminación atmosférica y las dinámicas del comportamiento meteorológico, principalmente la dirección de los vientos lo cual implica una afectación entre departamentos. De igual manera, contrastan con las dinámicas económicas de la localidad entre las cuales se encuentran fuentes principales de sustancias nocivas para la salud y la atmósfera.

10.2 Comportamiento meteorológico y climatológico en Puente Aranda

Dado que la contaminación atmosférica en la localidad de Puente Aranda es considerada el problema ambiental más relevante, debido a las descargas industriales realizadas por diversos sectores económicos

hace más de cincuenta años (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, Secretaría de Gobierno, 2008), el presente capítulo busca establecer una relación entre el comportamiento meteorológico y climatológico del lugar con respecto a los contaminantes más relevantes a la hora de referirnos a contaminación atmosférica generada por las principales fuentes fijas y móviles de la zona, los cuales pueden ser transportados por grandes corrientes de aire través del territorio nacional.

Los periodos de tiempo que más se tuvieron en consideración fueron los meses de diciembre para el año 2010 y 2015, y junio para el 2016, como consecuencia de que en dichos meses se presentaron los episodios más altos del fenómeno El Niño y La Niña (Figura 12.). No obstante, también se tuvo en cuenta el comportamiento de las variables para periodos de hace 30 años y los propios de los años determinados.

Figura 12. Episodios de cambio de temperatura, relacionados a los fenómenos de El Niño (rojo) y La Niña (azul).

2008	-1.6	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.3	0.9	0.4	-0.1	-0.6	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6
2011	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0
2012	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2
2013	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7
2015	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.5	2.6
2016	2.5	2.2	1.7	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1	-0.4	-0.7	-0.9	-1.0
2018	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	0.8
2019	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.5	0.3					

Fuente: Climate Prediction Center, 2019.

10.2.1 Precipitación

La zona central de Colombia, más específicamente refiriéndonos a la ciudad de Bogotá y el occidente del departamento de Cundinamarca presentan un régimen bimodal con picos de lluvia comenzando desde marzo hasta los meses de abril-mayo y el segundo comenzando en septiembre y durante todo octubre-noviembre, el cual es un comportamiento propio de los Andes. Los tiempos de sequía por otro lado se dan entre diciembre-febrero y julio-septiembre. También existen meses de transición los cuales son marzo, junio, septiembre y diciembre, donde el comportamiento es alternado entre tiempo seco y de lluvias (IDEAM, et al, 2014).

En el momento en que los fenómenos El Niño y La Niña se dan las tendencias estacionales que en un principio se veía mucho más marcadas pasan a ser inconstantes, incluyendo lluvias o tiempos de sequía en diferentes meses durante esos años (IDEAM, 2017). La precipitación promedio anual es de 184 y 307 mm en los meses lluviosos 3.4 y 9.8 mm en los meses secos, presentando un promedio total de 1000 mm al año (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2008).

10.2.2 Temperatura

El comportamiento de la temperatura de Bogotá oscila entre los 12 y 15°C a lo largo del año. Entre los meses de marzo y mayo se encuentran los promedios máximos. El cambio de temperatura entre el mes más frío y el más cálido varía hasta 1°C, por lo tanto, la temperatura de Bogotá se considera casi constante (IDEAM, 2017).

En cuanto a las temperaturas extremas, entre los meses de diciembre y febrero, puede llegar a ascender hasta los 25°C a ciertas horas del día, mientras que las temperaturas mínimas, que se presentan en las horas de la noche y la madrugada, llegan a -6°C en temporadas de alto calentamiento durante el día, permitiendo que se produzca escape de radiación por la noche y descenso de temperaturas por debajo de 0°C (IDEAM, 2007). En Puente Aranda, la temperatura media se encuentra en 12,4°C (Secretaría de Gobierno, 2008).

La temperatura de Bogotá durante el año 2010 se caracterizó por tener promedios altos durante el primer semestre y normales durante el último. La temperatura promedio durante este año en la estación de monitoreo de calidad del aire de Puente Aranda fue de 14,5°C, de este promedio la temperatura tuvo diferentes variaciones durante el año, teniendo en cuenta que en este año hubo aparición del fenómeno El Niño y La niña, entre los cuales la temperatura aumentó 10,8% (marzo) y descendió 3,0% (septiembre) respectivamente (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011).

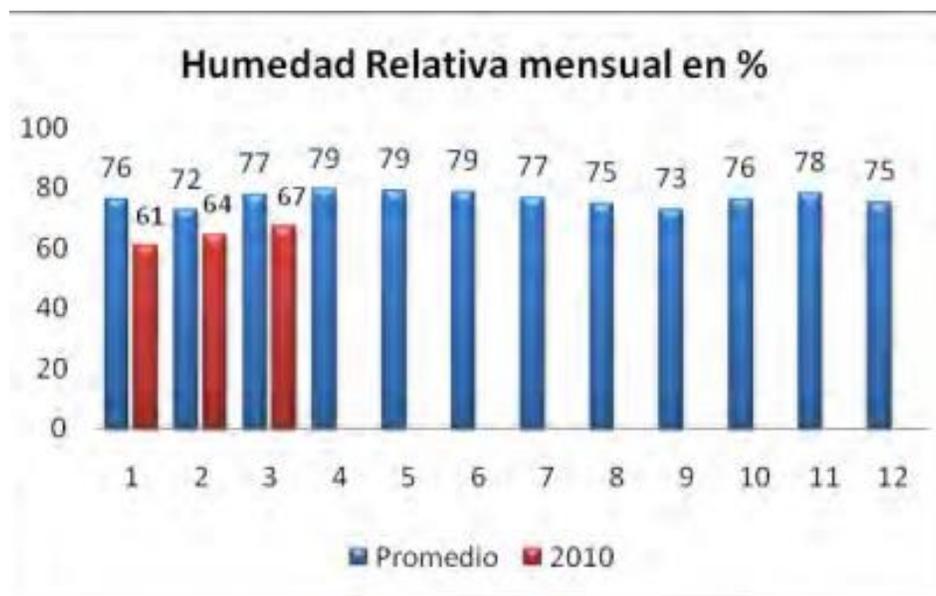
Hubo valores inesperadamente altos de la temperatura promedio mensual en el año 2015 con valores de hasta 15°C en los meses de mayo y noviembre. El promedio de temperatura durante el año 2015, en los registros de la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en la localidad de Puente Aranda fue de 14,4°C (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

10.2.3 Humedad relativa

Las masas de aire no son dependientes de la cantidad de agua por metro cúbico que contengan (humedad absoluta), sino que se refieren a la capacidad que posee el aire para absorber agua. Dicho aspecto depende también de la temperatura del aire ya que se necesita energía calorífica para ejercer la absorción del agua. Si se tiene una humedad absoluta estándar, la humedad relativa aumenta cuando desciende la temperatura (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

Estudios realizados por el IDEAM en el año 2010 sugieren que la humedad relativa fue menor para el primer trimestre del año, enero-febrero-marzo, debido a la presencia del fenómeno El Niño durante el cual se aumentaron las temperaturas superficiales. Así pues, considerando que en promedio la humedad relativa que se presenta en la ciudad de Bogotá es de 72%, se concluye en el informe que el trimestre observado fue notablemente seco.

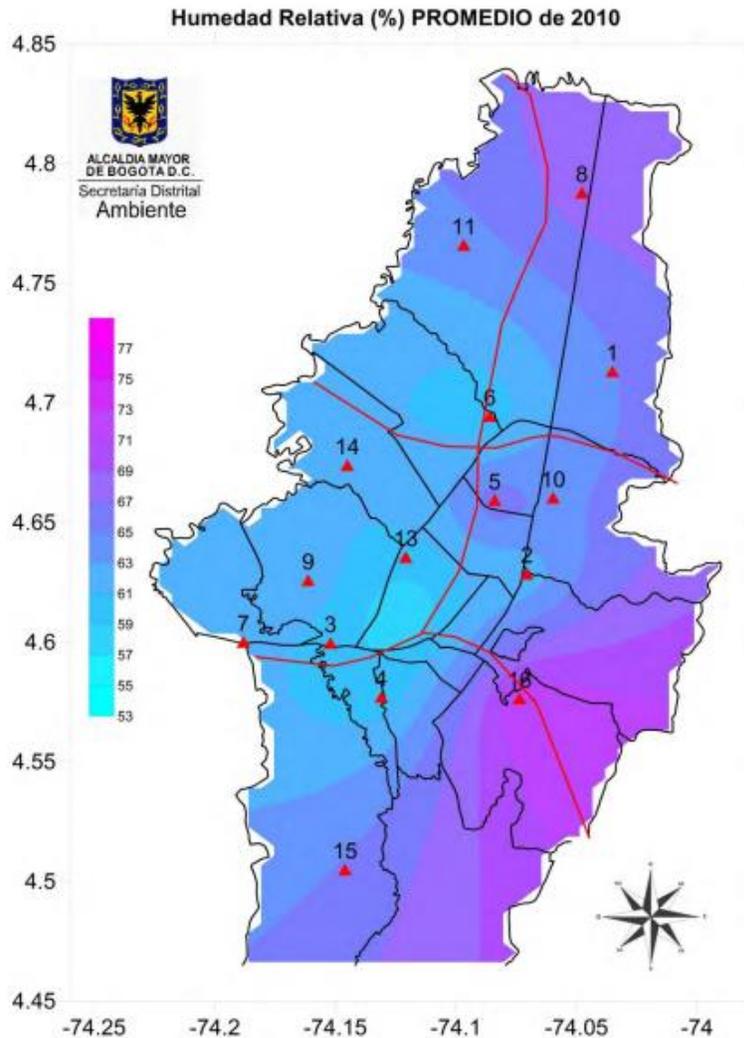
Figura 13. Humedad relativa mensual media del periodo 2006-2009 y su comparación con meses de estudio de 2010



Fuente: RMCAB, 2010

Las localidades que presentaron menor porcentaje de la variable en cuestión fueron Puente Aranda y Engativá respectivamente, tal y como se puede observar en la figura 14., donde se aprecian valores de 53-57% de humedad relativa. Lo anterior como resultado del comportamiento de la precipitación y la temperatura en los meses estudiados (trimestre EFM) (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010).

Figura 14. Mapa de humedad relativa promedio del trimestre EFM 2010, Bogotá (RMCAB).

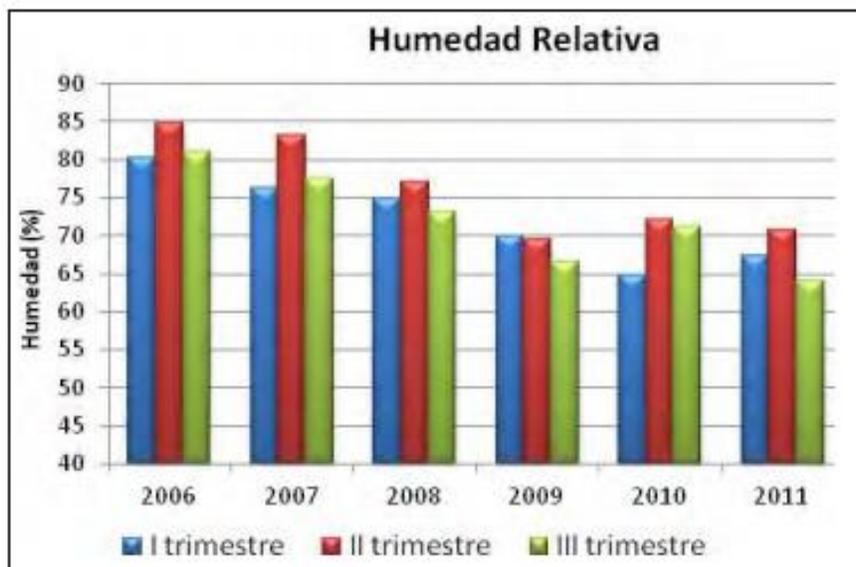


Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, (2010). Informe Trimestral de Calidad del Aire de Bogotá Primer Trimestre 2010. Tomado de http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Calidad_Aire_Bogota/Calidad_Aire_Bogota_Informe_Trimestre_1-SDA-2010.pdf

En comparación con los últimos 30 años, el año 2010 presentó menor humedad relativa que el año 2011 (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011) teniendo 8% de puntos menos aproximadamente, basándonos en información aportada por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), estación del Aeropuerto El Dorado, la cual presenta cercanía a la localidad de Puente Aranda. También como es posible apreciar en la Figura 15., en comparación los tres trimestres de los años 2009, 2010 y 2011 muestran comportamientos similares, aunque con algunas variaciones en el primer y tercer trimestre; para los meses donde se presentó fenómeno El Niño (agosto 2009 - abril 2010) ocurrió una ligera disminución de la humedad relativa oscilando en valores de aproximadamente 75%. Por su parte, los meses donde se presentó La Niña (julio 2010-junio 2011), se puede apreciar que los valores rondan el 67% - 80%. El promedio de los años donde se presentaron los fenómenos es de 77% para los meses de

fenómeno de El Niño y 82% para los meses de fenómeno de La Niña como se puede observar en la figura 15.

Figura 15. Humedad relativa mensual media del periodo 2006-2009 y su comparación con meses de estudio de 2010



Fuente: IDEAM, 2010

Figura 16. Valores de humedad relativa registrados en la estación Aeropuerto El Dorado, año 2009-2011

Colombia. Humedad relativa ¹ registrada en la estación Aeropuerto El Dorado ² de Bogotá, según año. 1972 - 2011													Porcentaje (%)
Año	Humedad relativa	Humedad relativa mensual											
		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
2009	79	84	83	88	84	80	77	76	76	71	78	80	76
2010	72	71	76	77	85	84	81	85	81	83	83	85	83
2011	80	79	82	83	84	81	78	76	76	76	82	86	79

Fenómeno	%
Promedio El Niño	77
Promedio La Niña	82

Fuente: Sistema de Información Hidrológica y Meteorológica -SISDHIM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM (2012). Colombia. Humedad relativa registrada en la estación Aeropuerto El Dorado de Bogotá, según año. 1972 – 2011. Tomado de <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/ptrim-text.pdf>

Para el año 2015, la humedad relativa en la ciudad de Bogotá presentó un promedio de 62,2 %, como es posible apreciar en la figura 17., de acuerdo con las principales estaciones de la RMCAB, evidenciando una disminución del valor con respecto al promedio del año 2010.

Figura 17. Promedios humedad relativa estaciones de la RMCAB, año 2015

Estación	Jan-15	Feb-15	Mar-15	Apr-15	May-15	Jun-15	Jul-15	Aug-15	Sep-15	Oct-15	Nov-15	Dec-15	Promedio (HPa)
C.D.A. R	64.1	66.8	68.8	66.1	64.8	66.1	64.8	62.5	60.9	64.9	68.9	62.3	65.1
Guaymaral	65.0	66.6	68.3	67.2	66.1	68.3	66.6	66.7	64.2	64.8	68.1	63.7	66.3
Kennedy	61.5	63.7	66.5	62.8	61.8	64.1	62.1	60.6	56.8	61.0	66.8	57.4	62.1
Las Ferias	59.6	61.4	64.3	62.4	60.7	62.5	60.8	59.7	57.0	59.1	64.5	57.4	60.8
San Cristobal	55.7	57.0	59.8	58.2	57.6	62.0	60.3	59.0	54.4	55.0	60.0	54.5	57.8
Tunal	59.7	60.8	64.1	62.4	61.1	65.4	62.1	61.1	57.3	59.7	64.4	58.3	61.4
mean	60.9	62.7	65.3	63.2	62.0	64.7	62.8	61.6	58.4	60.8	65.5	58.9	62.2

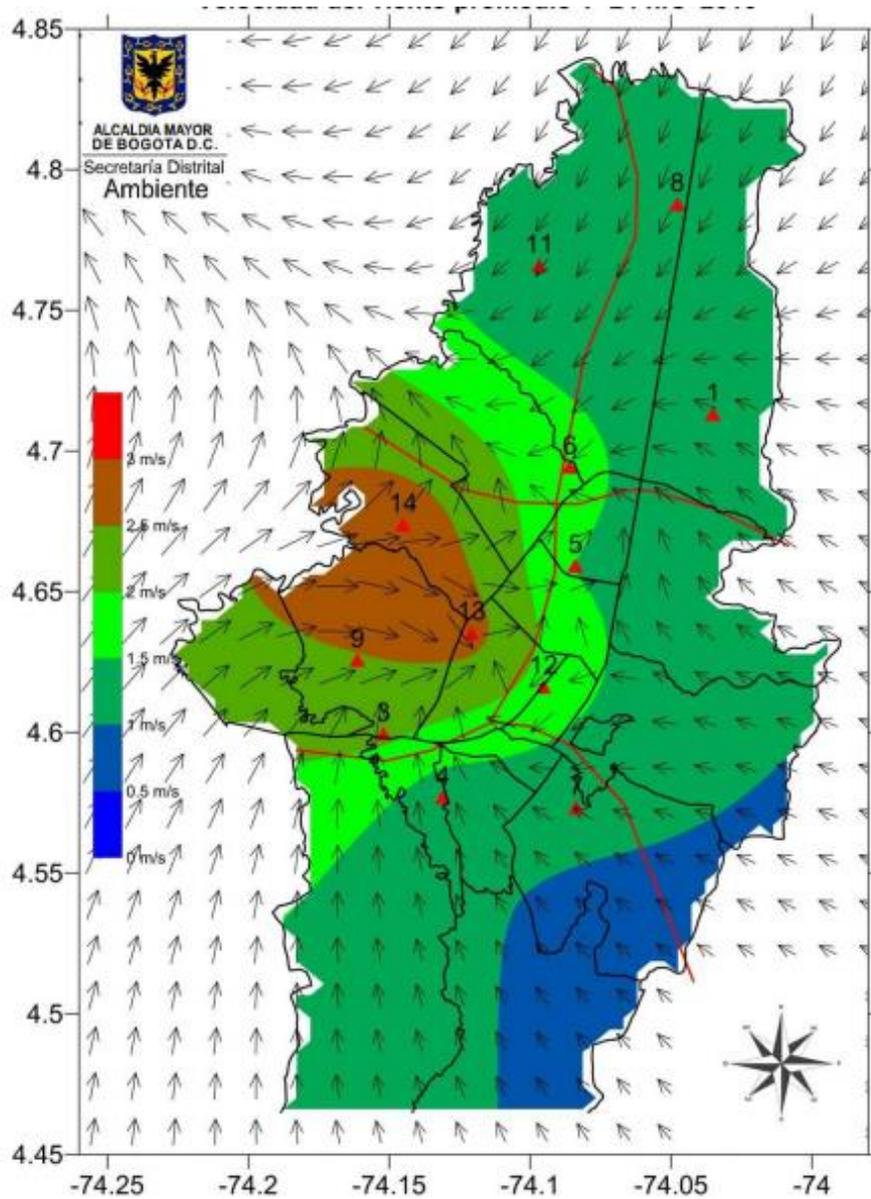
Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, (2015). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá 2015. Tomado de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dln_download&p=3205

10.2.4 Vientos

El comportamiento de los vientos tanto de Colombia como de Bogotá responde a los vientos del noreste y del sureste, los cuales se desplazan sobre todo el territorio de acuerdo con el movimiento de la zona de baja presión llamada zona de confluencia intertropical, que se desplaza de acuerdo a las temporadas de lluvia en el trópico. En Bogotá, específicamente en Puente Aranda, el comportamiento del viento se caracteriza por ser calmado en las mañanas y más leve en las tardes, esta tendencia se conserva a lo largo del año. Puente Aranda junto a Fontibón se caracterizan por presentar las mayores velocidades del viento en la ciudad, después de Kennedy (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011).

En general, se presenta un aumento de la velocidad del viento desde el suroriente al occidente de la ciudad y de Puente Aranda. La velocidad en la localidad para el año 2010 oscilaba entre 1,5 y 3 m/s (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011), este cambio de velocidades ocurrió porque en el centro de la localidad se juntaron vientos provenientes de diferentes direcciones manipuladas por la orografía que rodea la ciudad, causando que las mayores velocidades perdieran fuerza y se desplazarán al norte de la ciudad con menor impulso (Figura 18.).

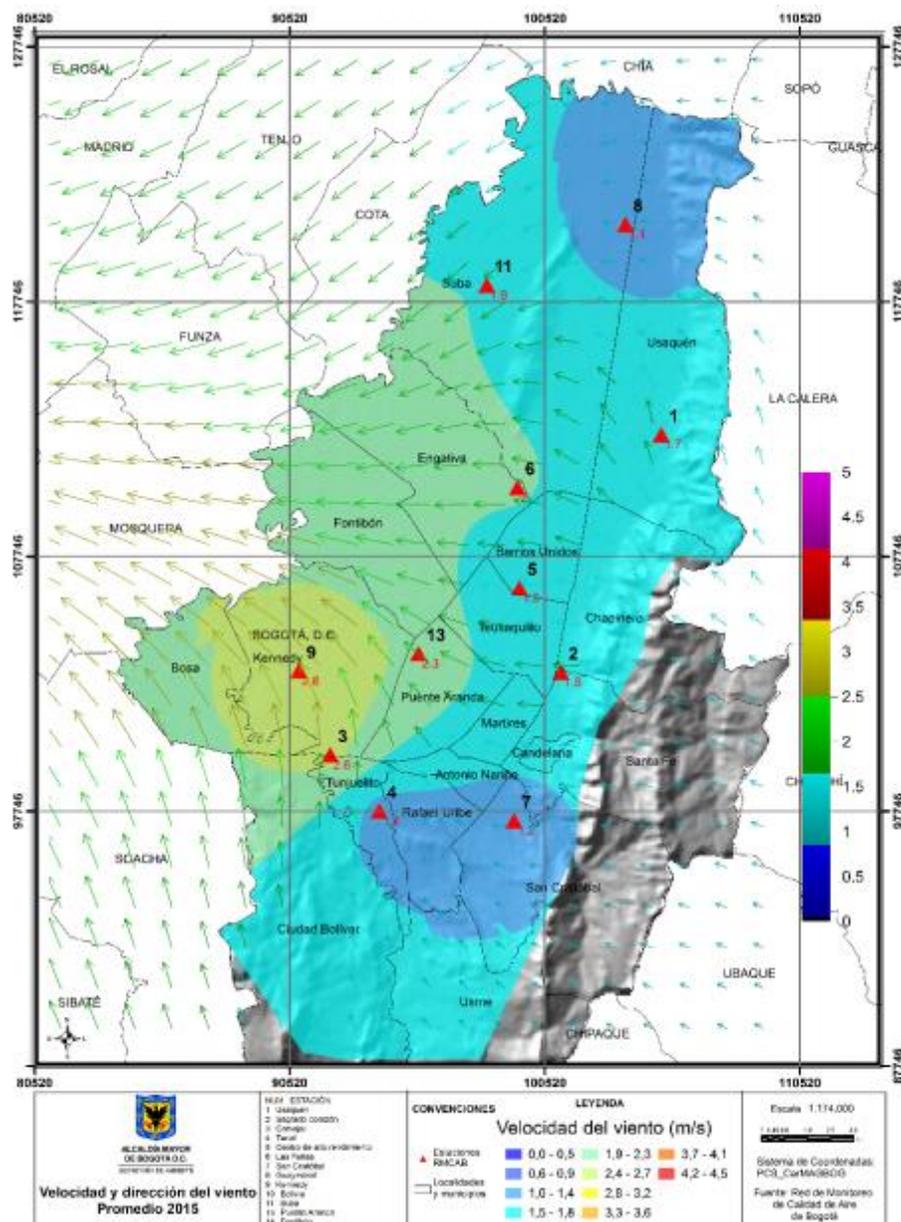
Figura 18. Velocidad y dirección del viento promedio en el 2010



Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, 2011

En el año 2015, la velocidad promedio del viento fue de 2,3 m/s, presentó uno de los valores más significativos en las horas de la tarde (3,9 m/s) por su predominancia en dirección del noreste al oeste (Figura 19). El valor máximo de velocidad del viento en la ciudad en los meses de enero y diciembre del mismo año (Secretaría Distrital de Ambiente, 2016).

Figura 19. Velocidad y dirección promedio del viento en el año 2015.



Fuente: Secretaría Distrital de Ambiente, 2016.

10.2.5 Viento bajo (10 m)

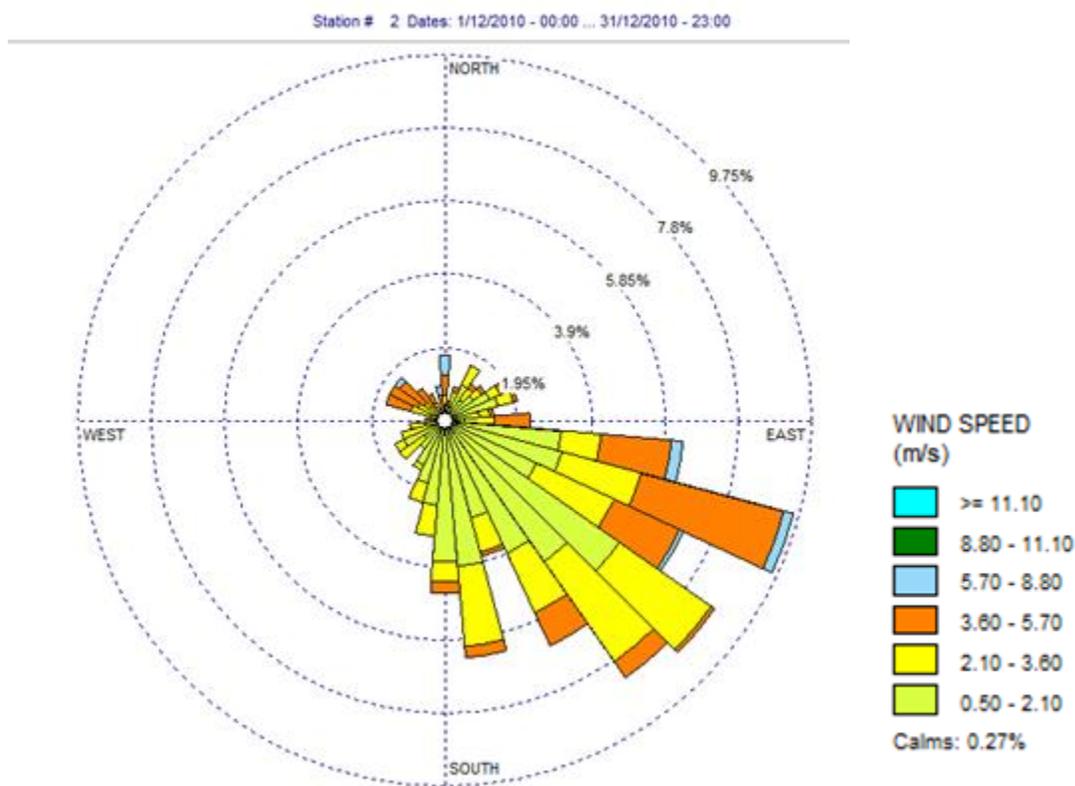
Sobre el territorio del país predomina el flujo de vientos débiles con velocidades no mayores a 2m/s en amplias zonas de alturas casi iguales al nivel sobre el mar, en el centro continental. Gran parte del año, se presentan velocidades cercanas a los 5 m/s en el Pacífico y el caribe, alrededor del complejo de los Andes, incluyendo el altiplano cundiboyacense, el piedemonte llanero y el norte del Cesar (IDEAM, 2017).

Durante todo el año se presentan vientos iguales o superiores a 5 m/s, aun alcanzando velocidades de 11 m/s en la península de La Guajira. Para los periodos comprendidos entre diciembre y abril, se observan vientos que llegan a los 4 m/s en el Golfo de Urabá, la cuenca del río Sinú, en el medio Magdalena y en el sur del río Sogamoso; y velocidades de 5 m/s en los departamentos de Bolívar, Atlántico, Huila, Meta y el sur del Cesar. Entre los meses de mayo y septiembre, por los últimos mencionados atraviesan vientos de velocidades que alcanzan los 6 m/s, incluyendo Cundinamarca y Boyacá. Finalmente, para octubre y noviembre se mantienen condiciones parecidas que las primeras descritas; sin embargo, las velocidades del viento en La Guajira disminuyen a 6 m/s (IDEAM y UPME, 2006)

10.2.6 Rosas de Vientos de Puente Aranda

Como se observa en la figura 20., desde la estación meteorológica de Puente Aranda, el viento alcanza en su mayoría de frecuencias una dirección predominante hacia el Sureste, la dirección con mayor alcance tiene porcentaje de frecuencia 9,75%, por lo cual, teniendo en cuenta las elevaciones seleccionadas para este estudio, el viento proveniente de Puente Aranda corta con velocidad máxima de 5 m/s contra la formación montañosa de La Macarena. Debido a aparición del fenómeno de La Niña con las temperaturas más bajas registradas durante el periodo observado en la figura 12., la velocidad del viento alcanza su máxima fuerza. La dirección del viento se ve influenciada por la orografía que conforman los Cerros Orientales, los cuales dificultan el paso de viento desde el nivel del suelo, por lo que estos atraviesan Bogotá en el sentido Sureste (Euscátegui y Hurtado, 2011).

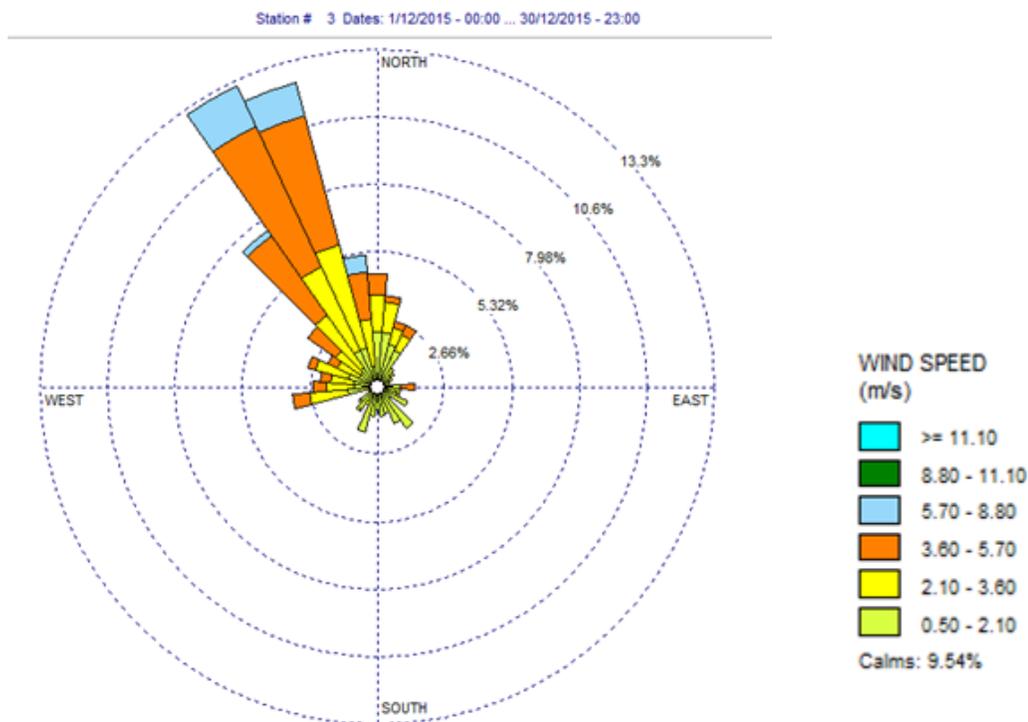
Figura 20. Rosa de vientos diciembre de 2010



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

En diciembre del 2015 se registraron vientos con velocidades de hasta 6 m/s en la estación de monitoreo de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. De igual manera, las corrientes del sur atravesaron la zona de Puente Aranda, esto ocurre porque debido a que a mediados de este mes se presentan descensos en las precipitaciones en el norte de Perú (Vergara, 2015), la velocidad de los vientos provenientes del sur del Pacífico, a esto se le llama la Corriente de Humboldt. La corriente de Humboldt es un movimiento marino originado en las costas de Chile y asciende al norte del continente, paralelamente con los vientos alisios del sur, al desplazar las aguas frías a la superficie (Janota, 2015), por lo tanto disminuye la temperatura y se intensifica la velocidad del viento, este, para llegar a Puente Aranda atraviesa la cordillera oriental en el paso donde se encuentra la vía Bogotá-Villavicencio y toma una orientación al Noroeste al elevarse y toparse las formaciones montañosas ubicadas en el Parque Nacional Natural Paramillo.

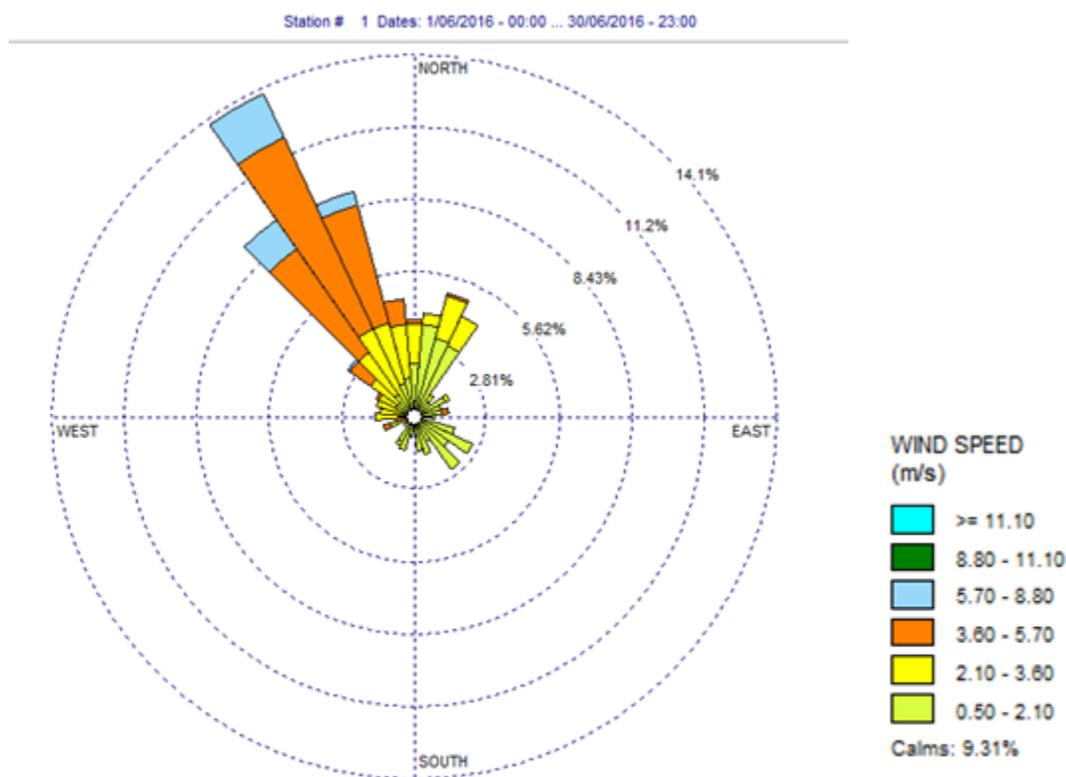
Figura 21. Rosa de vientos diciembre de 2015



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

En el mes de junio del 2016, el viento que atraviesa Puente Aranda está conformado por los alisios del Sureste, los cuales durante esta época del año tienen predominancia debido al movimiento de la ZCIT hacia el norte (Figura 5.). Se registraron velocidades promedio de 4 m/s en dirección Noroeste. Tal como ocurre en el mes de diciembre del 2015, los vientos que atraviesan Puente Aranda se elevan hasta las montañas altas del Parque Nacional Natural Paramillo y se desvían al oeste.

Figura 22. Rosa de vientos diciembre de 2016



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

10.3 Relación de todas las variables metodológicas

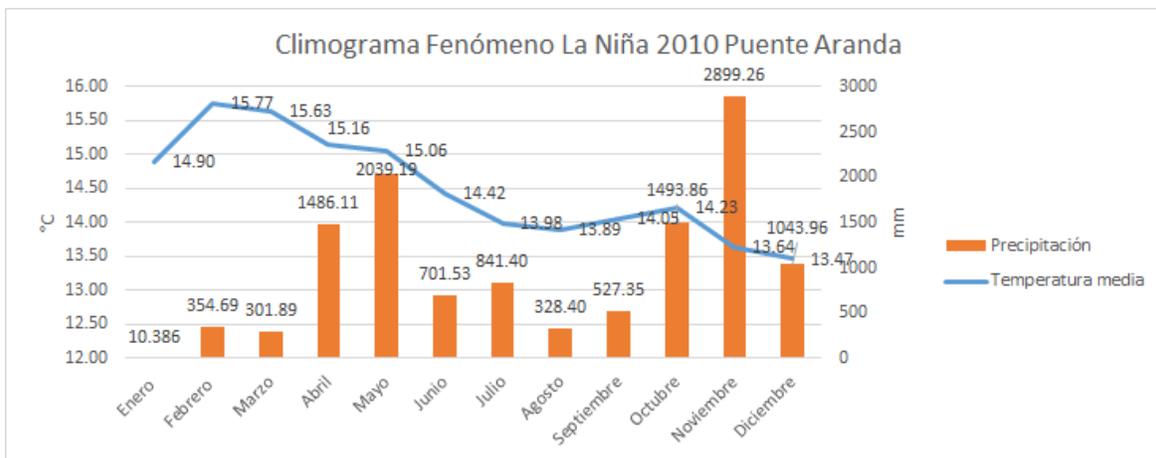
Para el año 2010 se observa que las curvas y gráficos de barras realizados a partir de los valores reportados por la estación meteorológica de Puente Aranda, presentan una relación inversa entre la temperatura y la precipitación durante todo el año. Entre los meses de febrero y marzo el promedio de la precipitación fue bastante bajo y por ende la temperatura fue la máxima de todo el año. Entre los meses de noviembre y diciembre se presentó la temperatura más baja debido a la aparición del fenómeno La Niña, que comenzó desde julio, pero tuvo mayor fuerza en los meses finales del año. El pico de precipitación se presentó en el mes de noviembre alcanzando un valor de 2899,26 mm y convirtiéndose en el valor más alto de lluvias que se presentó en los años observados. En los meses de junio a septiembre la temperatura fue baja junto a las precipitaciones, esto se debe a que es durante esta época del año hay aumento en la velocidad del viento respecto al resto del año por cambios macro climáticos que ocurren por el efecto de los vientos alisios del sureste, que se desplazan hacia el norte y localizan su máxima intensidad sobre gran parte del sur y centro del territorio colombiano, efecto que ocurre todos los años y se evidencia a lo largo de los climogramas propuestos.

De acuerdo a lo mencionado previamente, la humedad relativa de Puente Aranda también tuvo variaciones durante el 2010, en el primer trimestre, cuando estaba terminando el Fenómeno El Niño, la humedad relativa tuvo menor porcentaje que el resto del año, ya que las precipitaciones fueron las más

bajas y la temperatura fue la más alta, por ende también, la velocidad del viento fue baja debido a que esta depende de la temperatura y la luminosidad que recibe la ciudad de modo que se desacelera su movilidad.

A finales del año 2010 la humedad relativa alcanzó 80% puesto a que en estos meses estaba en plenitud el fenómeno La Niña, debido a que hubo mayor precipitación y las lluvias eran casi permanentes como resultado del episodio del fenómeno registrado más fuerte históricamente, la temperatura bajó en gran cantidad y favoreció el paso del viento por la localidad.

Figura 23. Climograma Puente Aranda 2010



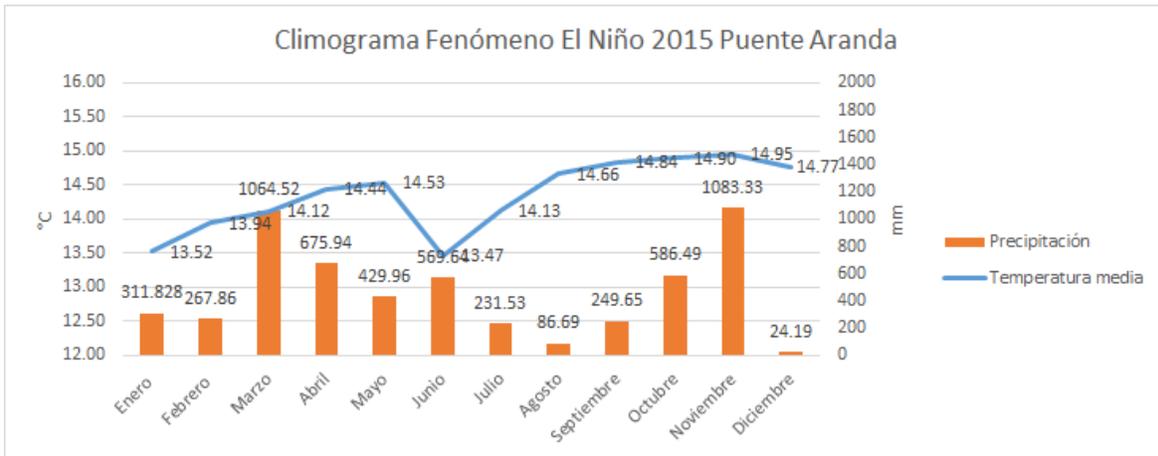
Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

Hubo permanencia completa del fenómeno El Niño durante todo el año 2015, fue este año donde se presentó el episodio más caliente registrado históricamente. Dada la presencia del fenómeno, se registraron temperaturas más altas del promedio durante casi todo el año, las precipitaciones más grandes, y por ende las humedades relativas de mayor porcentaje aparecieron en los meses de marzo y noviembre, fue precisamente en estos meses, además de agosto y septiembre (desplazamiento de los alisios), que se favoreció el aumento en la velocidad del viento en la zona.

En el mes de junio se observa un descenso en la temperatura durante el cual, a pesar de evidenciar un aumento en la precipitación leve, la humedad relativa no aumenta significativamente. Lo anterior debido a que hay presencia de lluvias y en este mes existe un desplazamiento más veloz de la ZCIT, proporcionando así las condiciones apropiadas para que la velocidad del viento aumentase y se dé el aumento de las precipitaciones.

De igual manera, en los meses donde se presentó mayor precipitación (marzo y noviembre) no se vio afectada suficientemente la temperatura del mes, ocasionando que la humedad relativa no aumentara, esto se debe a que el fenómeno El Niño tenía suficiente vigor durante ambos periodos ya que en estos el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical está ocurriendo, por eso aumentó la precipitación en estos meses, pero no causó mayor efecto en la temperatura y el fenómeno El Niño.

Figura 24. Climograma Puente Aranda 2015



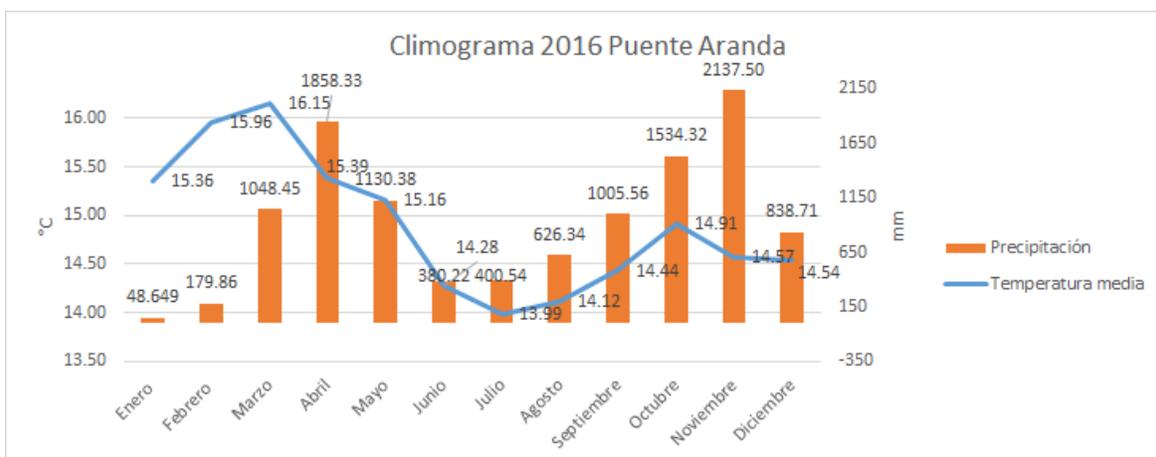
Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

En el año 2016 hubo tanto fenómeno La Niña como fenómeno El Niño, y como resultado hubo bastante variabilidad climática. Entre los meses de enero y mayo, se estaba dando fin a la temporada del fenómeno El Niño, es por esto que, al perder fuerza, aumentó la precipitación, de manera equivalente también la humedad relativa y descendió la temperatura a medida que aumentaban los anteriores factores. La velocidad del viento también hizo parte fundamental en este cambio, dado que la temperatura también se vio afectada en gran medida por este.

Entre los meses de junio y julio no hubo presencia de los fenómenos mencionados, es por esto que los factores meteorológicos aquí estudiados, se mantuvieron en condiciones completamente normales, además, en el mes de junio se observó que la temperatura promedio fue la única que no tuvo cambio alguno ocasionado por los demás elementos meteorológicos

Finalmente, desde el mes de agosto se dio inicio al fenómeno La Niña, este llegó a su punto de apogeo en el mes de octubre, por lo tanto hubo mucha más lluvia que a principio del año, la humedad relativa llegó al 100%, los vientos aumentaron desde el mes de agosto y se mantuvo a grandes velocidades durante el final del año y las temperaturas fueron en descenso, mostrando sus picos más altos en promedios de 15°C durante el primer trimestre del año y finalizando el año con temperaturas de 14°C.

Figura 25. Climograma Puente Aranda 2016



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

Los cambios meteorológicos tienen un rol importante en la dinámica de desplazamiento de sustancias contaminantes emitidas por la actividad productiva realizada en Puente Aranda. En aquellos momentos donde hay aumentos de precipitación y de igual manera, humedad del aire, las partículas de agua que permanecen en el aire reaccionan con gases generados de la combustión de hidrocarburos específicamente con los SO_x y los NO_x; estos se condensan y se precipitan en forma de niebla y de lluvia ácida (Secretaría Distrital de ambiente, 2018). Por el lado del material particulado, los procesos de precipitación facilitan la bajada y acumulación de este que se encuentra suspendido en el aire.

En aquellos episodios donde aumenta la temperatura, el aire pierde densidad, por lo que las sustancias contaminantes ascienden con mayor rapidez hacia la atmósfera y reaccionan con menos agua, así que los vientos de la superficie de la troposfera, que cuentan con velocidades mucho mayores que las que se encuentran en la superficie, desplazan con rapidez los contaminantes a otras regiones.

10.4 Capa límite y dinámica de la contaminación atmosférica

En física, la capa límite está definida como la región donde un líquido o un gas entre en contacto con la superficie material, ya que en este espacio tiene lugar el intercambio de movimiento, calor o masa (Castro, González y Portela, 1991). Es por esto que la capa límite atmosférica se forma en consecuencia de las interacciones entre la atmósfera y el suelo. La circulación de la capa límite se caracteriza por el comportamiento del viento que se mueve según la estructura misma de la meteorología del territorio, descrito esto, la capa límite varía notablemente en el tiempo respondiendo a la naturaleza de la rugosidad del suelo y la turbulencia del viento en contacto con la superficie (Garrat, 1992). Según la investigación realizada por Ortiz (2016), donde realizó medición y caracterización de la turbulencia atmosférica de Bogotá, determinó que la capa límite atmosférica fluctúa en alturas entre 600 y 2200 metros, para un promedio diario de 1000 m sobre el nivel del suelo.

Con respecto a la velocidad promedio que presenta la ciudad de Bogotá es posible realizar la aproximación del valor de la capa límite con respecto a la velocidad del viento promedio la cual es de 2 m/s aproximadamente lo cual corresponde a una altura de la mezcla en metros de 1200 m.

Tabla 5. Reglas para estimar la clase de estabilidad atmosférica y las alturas de la mezcla a partir de la velocidad del viento y el grado de insolación.

	Velocidad del Viento	Clase de Pasquill (Estabilidad Atmosférica)	Altura de la mezcla (m)
Día (Alta Insolación)	0-2 m/s	A (muy inestable)	1600
	2-3 m/s	B (inestable)	1200
	3-5 m/s	C (ligeramente inestable)	800
	>5 m/s	D (neutra)	560
Día (Baja Insolación)	0-2 m/s	B	1200
	2-3 m/s	C	800
	3-5 m/s	D	560
	>5 m/s	D	560
Noche	0-2 m/s	F (estable)	200
	2-3 m/s	F	200
	3-5 m/s	E (ligera estabilidad)	320
	>5 m/s	D (neutra)	560
	Nublado	D	560

Fuente: IDEAM, s.f.

La relación que existe entre el espesor de la capa de mezcla y la contaminación atmosférica es que la última puede quedar retenida en dicha capa. De acuerdo con la afirmación de Arya (1988), la capa de mezcla se considera un estrato libre a través del cual se transportan y difunden los contaminantes liberados provenientes de la superficie, de modo que las emisiones de los estratos más bajos se quedan atrapados en el volumen de aire delimitado verticalmente por la capa de mezcla.

La limitación y diferenciación del volumen de aire donde se pueden mezclar los contaminantes tienen como resultado una disminución en la visibilidad dentro de las capas bajas atmosféricas, lo cual se puede apreciar más claramente desde la perspectiva de las grandes áreas de influencia como los núcleos urbanos e industriales (Núñez, 2002), como lo es la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá.

De cualquier forma, Núñez (2002) afirma con respecto a la capa de mezcla que “se debería considerar como el volumen completo de aire en el que potencialmente una masa contaminada podría ser dispersada y transportada. Que alcance el tope vertical de la capa de mezcla o no, dependerá como se ha visto, de muchos y diversos factores y circunstancias”.

10.5 Contaminantes atmosféricos

10.5.1 Material particulado (PM_{10})

El material particulado es un contaminante que consiste en una mezcla de partículas tanto sólidas como líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, las cuales se diferencian entre sí por propiedades físicas como el tamaño o la composición química. Puede ser emitido a la atmósfera directamente (PM primario) o formarse a partir de gases precursores (principalmente dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles) (Calvo, D, et al, 2009).

En específico el PM_{10} se refiere a las partículas con un diámetro $<10 \mu m$, cuyos componentes químicos más importantes pueden ser sulfatos, nitratos, amonio y otros iones inorgánicos (como Na^+ , K^+ , Ca^{2+}).

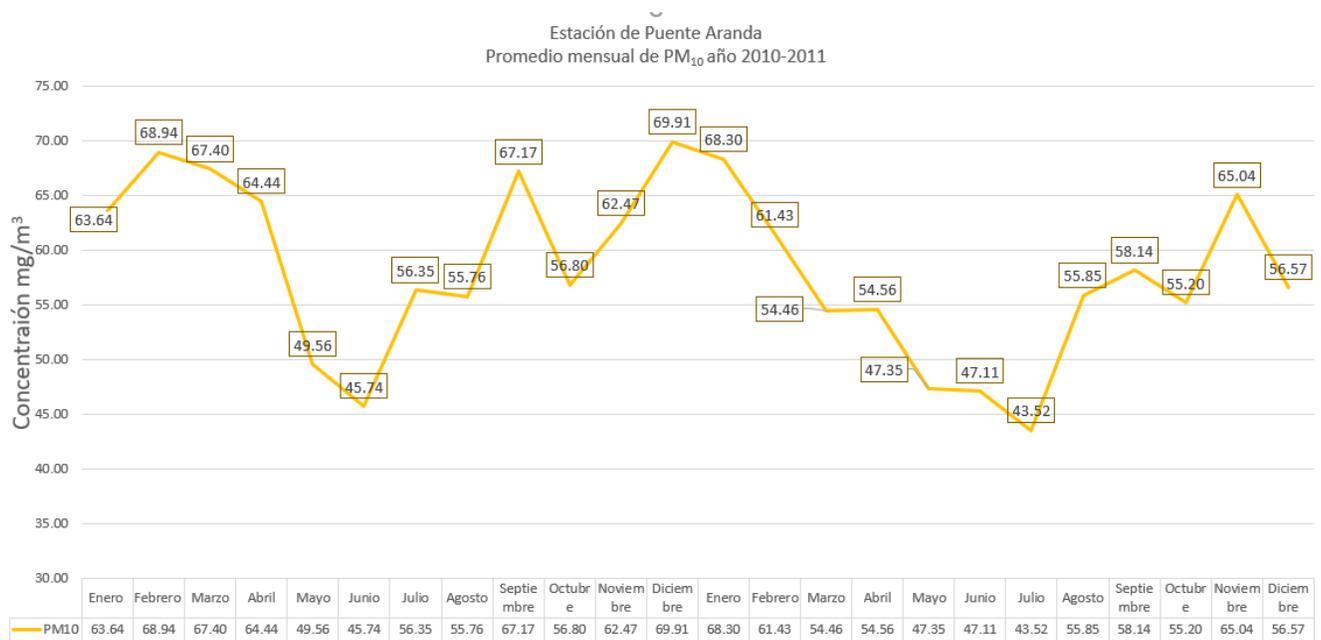
+, Mg²⁺ y Cl⁻), compuestos orgánicos, agua ligada a partículas y metales pesados. Las partículas más grandes (con el diámetro entre 2.5 y 10 µg/m³, es decir, la fracción gruesa de PM₁₀) suelen contener polvo el cual puede provenir de carreteras cercanas o la industria (World Health Organization, 2006).

Los de tamaño entre 0.1 µm y 1 µm pueden permanecer en la atmósfera durante días o semanas y, por lo tanto, pueden transportarse a largas distancias en la atmósfera (hasta miles de kilómetros). Las partículas gruesas se depositan más fácilmente y típicamente viajan a menos de 10 km de su lugar de generación. Sin embargo, las tormentas de polvo pueden transportar polvo mineral grueso por más de 1000 km (World Health Organization, 2006).

De acuerdo a los informes de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, en Puente Aranda, los valores recolectados de emisiones de PM₁₀ suelen ser los mayores de la ciudad. Dado que en la localidad se encuentran establecidos circuitos productivos de diferentes actividades industriales de alto impacto ambiental, estas se congregan en los barrios de Centro Industrial, Salazar Gómez, Ortezal, Pensilvania, Industria Centenario, San Rafael industrial, La pradera y Trinidad (Recio, 2017). Por lo tanto, es en la industria de todo tipo que desarrolla sus actividades en estos barrios, que además utilizan combustibles sólidos hacen parte de las principales fuentes de emisión de material particulado (PM₁₀).

De acuerdo con los datos recolectados de la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en Puente Aranda, entre los años 2010 y 2011 se observaron gran cantidad de fluctuaciones en el promedio mensual. Entre estas fluctuaciones se destacan puntos de gran cuidado ya que, en promedio, los valores se aproximaron a los límites permitidos de exposición de la norma en varias ocasiones, por ejemplo, en febrero (68,94 µg/m³), marzo (67,40 µg/m³), septiembre (76,17 µg/m³) y diciembre (69,91 µg/m³) del 2010; y, enero (68,30 µg/m³) y noviembre (65,04 mg/m³) del 2011.

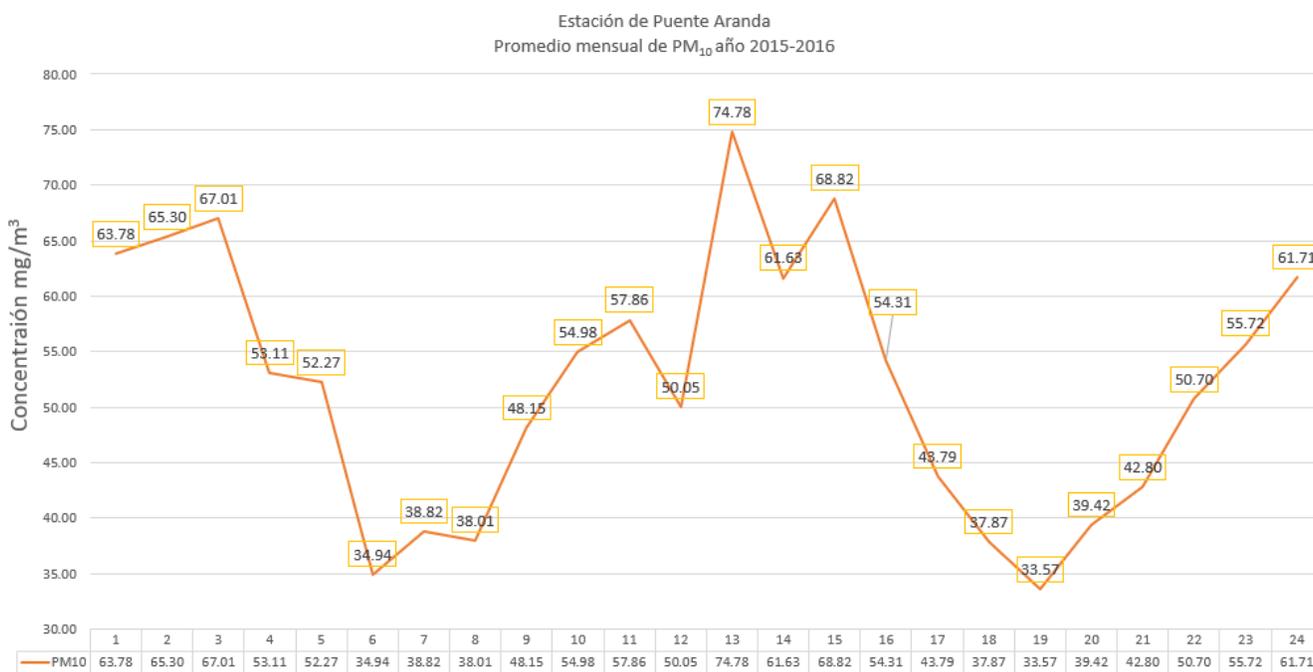
Figura 26. Promedio mensual de PM10 años 2010-2011



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

Por otra parte, en los años 2015 y 2016, también se observó gran cantidad de cambio en el promedio mensual de emisiones de PM10, se observó que en los meses de junio (34,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) del 2015 y julio (33,57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) del 2016 se registraron los valores más bajos de emisiones, mientras que en los meses de marzo (67,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) del 2015, enero especialmente (74,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), marzo (68,82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y diciembre (61,71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de 2016 se encontraron los picos más altos de emisiones del periodo evaluado.

Figura 27. Promedio mensual PM10 años 2015-2016



Fuente: Creación propia con adaptación de RMCAB

10.5.2 Dióxido de azufre SO₂

La principal fuente de generación de SO₂ en la localidad son los procesos industriales y durante la quema de combustibles como resultado de la quema de los derivados del petróleo o el carbón (CRANA, s.f). El dióxido de azufre es un gas que tiene una larga vida útil pero una corta vida media en la atmósfera (2 a 4 días), y una velocidad de reacción lenta cuando se relaciona con otras sustancias. Al tratarse de un contaminante primario, puede causar la formación de contaminantes secundarios como por ejemplo trióxido de azufre (SO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄), después de cierto tiempo al entrar en contacto con el aire y la humedad (Sudalma, et al., 2014; CRANA, s.f).

Son excelentes núcleos de condensación y por esta razón provocan problemas de visibilidad en la atmósfera. Se caracterizan por corroer materiales y ser precursores de lluvia ácida y de partículas secundarias que causan enfermedades cardiacas (sulfatos) y respiratorias (SIAC, Sistema de información Ambiental de Colombia, 2014).

Tiene un gran potencial para ser transportado a grandes distancias ya que los gases permanecen en la atmósfera por varios días, durante los cuales pueden viajar largas distancias (más de 500-1000 km) incluso llegando a traspasar fronteras. El SO₂ se disuelve en el vapor de agua lo cual la acidifica formando finalmente ácido sulfúrico (H₂SO₄) e interactúa con otros gases llegando a formar partículas conocidas como sulfuros las cuales son perjudiciales para la salud de humanos y ecosistemas. Las partículas de sulfato se combinan con otros compuestos presentes en la atmósfera como el amoníaco, para así contribuir en la formación de material particulado PM_{2.5} (Clean Air Initiative for Asian Cities Center, 2010).

Se tuvieron en cuenta los años de 2010, 2015 y 2016 para el estudio del comportamiento del contaminante. Para el año 2010 los meses que presentaron mayores picos de dióxido de azufre fueron marzo y diciembre con valores de 5,4 y 5,1 ppb respectivamente. Por su parte los de menores valores fueron abril, agosto, septiembre y octubre con valores entre 2,8 y 2,9 ppb.

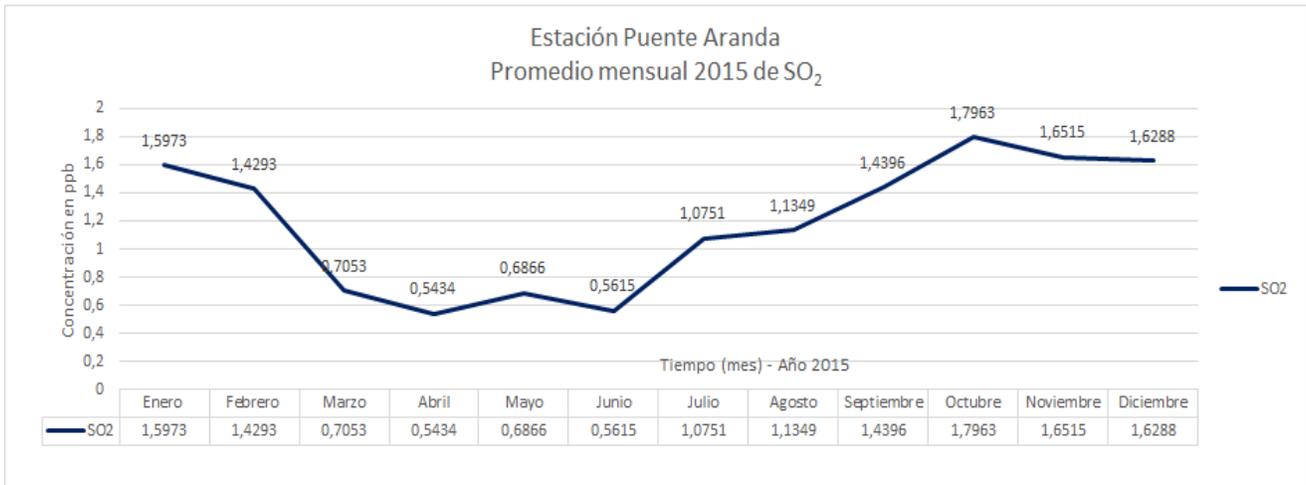
Figura 28. Promedio mensual de SO₂ Puente Aranda para 2010



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

Para el año 2015 el mes de mayor pico de SO₂ fue octubre y el de menor abril y junio con valores de 1,7 y 0,5 ppb respectivamente, observando un aumento considerable desde el mes de junio hasta octubre donde se vuelve a disminuir, pero esta vez en menor proporción.

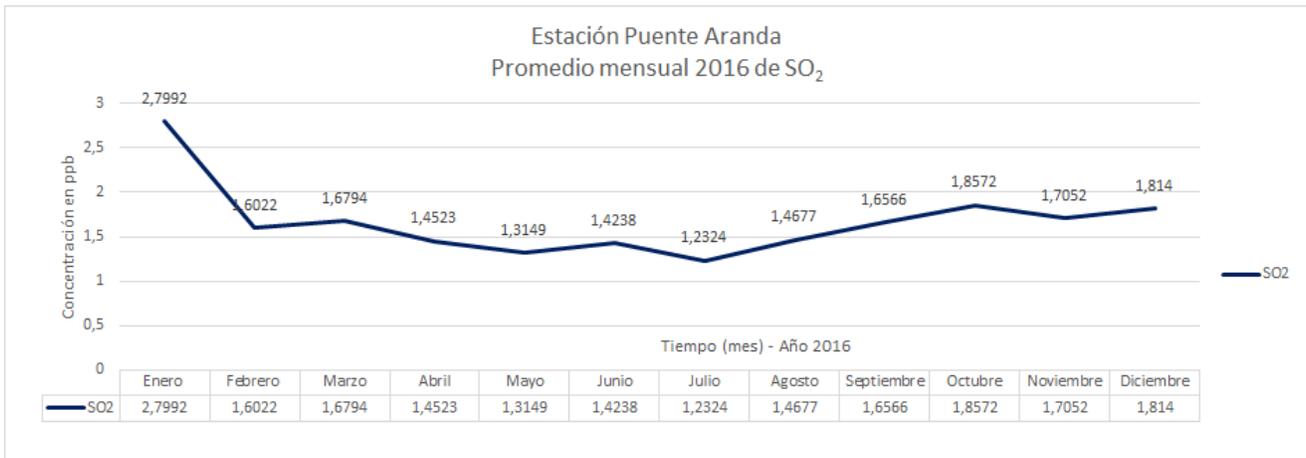
Figura 29. Promedio mensual de SO2 Puente Aranda para 2015



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

En cuanto al año 2016 el mes de mayor valor de dióxido de azufre fue enero con un valor de 2,8 y julio el de menor con 1,2 ppb. Las dinámicas de comportamiento del dióxido de azufre para los tres años pueden deberse a que durante los picos más altos se han presentado vientos débiles los cuales dificultan la dispersión de los contaminantes primarios, dentro de los cuales se encuentra el dióxido de azufre (Calvo, et al., 2009), así como también puede deberse a la influencia de episodios previos o posteriores a precipitaciones.

Figura 30. Promedio mensual de SO2 Puente Aranda para 2016



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

10.5.3 Óxidos de nitrógeno NO_x

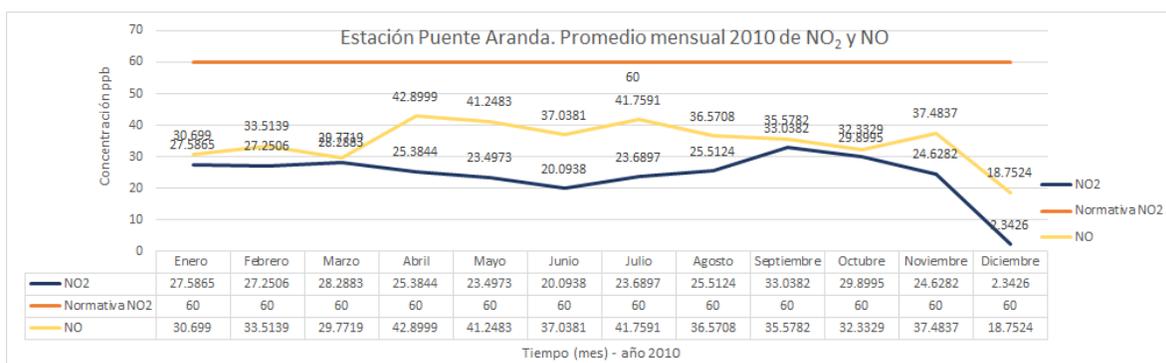
Las emisiones de NO₂ son producidas normalmente por la combustión de carbón, gas natural o petróleo, proceso tal que ocurre con los vehículos motorizados; en la Ciudad de Bogotá existe gran cantidad de vehículos que se movilizan a diario y forman trancones, debido a esta actividad se concentra y se emite

en mayor cantidad el NOx. De igual manera, en Puente Aranda existen industrias que utilizan que utilizan estos compuestos orgánicos para la fabricación de bienes. Existen 752 fábricas que trabajan con ACPM, carbón mineral y crudo, estas representan el 68% de las ubicadas en Puente Aranda y representan gran riesgo en la salud de los habitantes de la localidad y de toda la ciudad (El Tiempo, 2008).

Los óxidos de carbono son gases que contribuyen al deterioro de la calidad del aire que respiran las personas y a producir lluvia ácida. En zonas urbanas, las emisiones son mayores, tienen la capacidad de bloquear la entrada de luz, reduciendo la visibilidad y pueden ser transportados a largas distancias (The Conference Board of Canada, 2013). Al realizar experimentos de simulación de sistemas de observación, Kuo, et al. (1985), como resultado determinaron que, en la atmósfera, bajo cálculos de trayectoria isentrópica, sugieren que después de mediciones de 72 horas del viaje del viento junto a sus contaminantes, se pueden desplazar horizontalmente hasta 400 km de distancia.

A pesar de que en los años elegidos para realizar el estudio no se excedió la norma colombiana en tema de emisiones de NOx, en el año 2010 durante los meses de marzo (28,28 ppb), septiembre (33,04 ppb) y octubre (29,90 ppb) se registró la mayor concentración de NO₂ durante todo el año. Sin embargo, por el lado del monóxido de carbono, hubo registro de emisiones en abril (42,90 ppb) y julio (42,76 ppb) que resultan de niveles más altos que del dióxido de carbono.

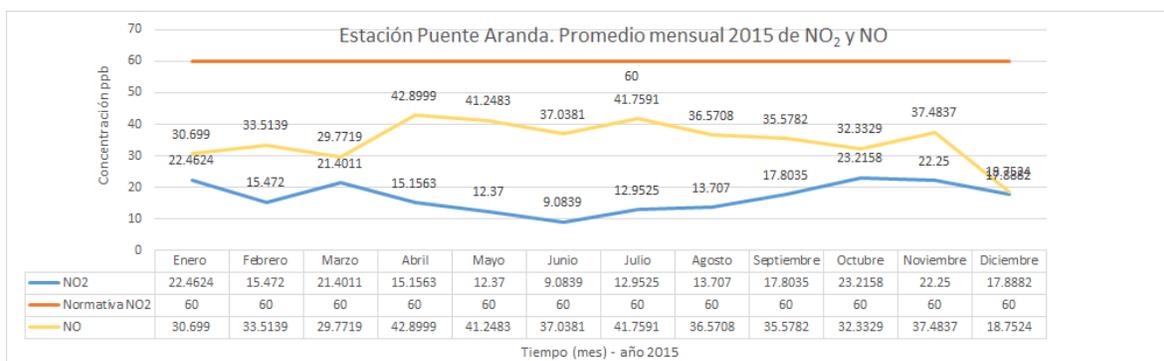
Figura 31. Promedio mensual de NO y NO2 Puente Aranda para 2010



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

En el año 2015 se puede evidenciar que las emisiones registradas de NO₂ forman una curva poco pronunciada de cambio mensual, sin embargo, se observan 3 picos de máxima concentración registrada en enero (22,46 ppb), marzo (21,40 ppb) y octubre (23,22 ppb), estos promedios no son causantes de episodios de contaminación graves en la localidad porque no exceden la norma colombiana. A pesar de no exceder la norma, sigue representando contaminación del aire. La contaminación registrada de NO, por otra parte, es mayor y se observan concentraciones más altas durante todo el año, las más representativas y de cuidado se encuentran en abril (42,9 ppb), mayo (41,25 ppb) y julio (41,76 ppb).

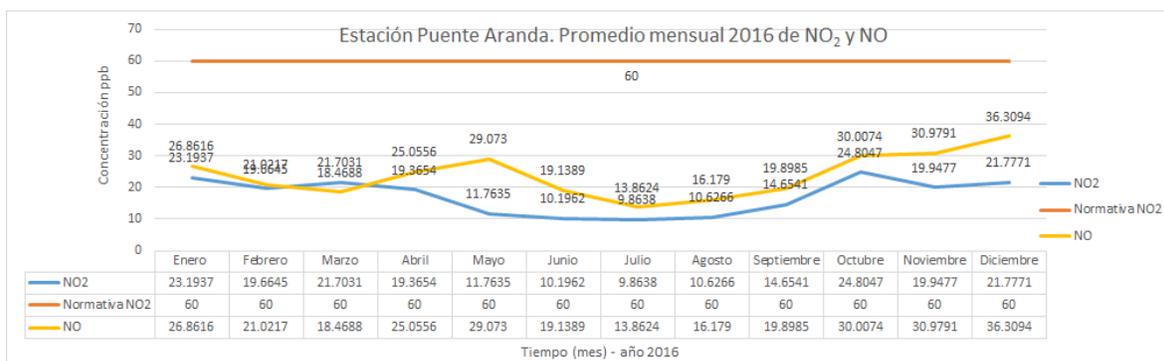
Figura 32. Promedio mensual de NO y NO₂ Puente Aranda para 2015



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

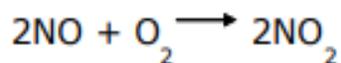
Finalmente, en el 2016 se observó un gran descenso en las emisiones de NO y NO₂ entre los meses de mayo y septiembre, y marzo y septiembre respectivamente. En cuanto al NO₂, hay únicamente 2 picos de mayor concentración en marzo (21,7 ppb) y octubre (24,8 ppb), mientras que, en emisiones de NO, los picos más altos permanecen entre 29,1 ppb y 36,31 ppb.

Figura 33. Promedio mensual de NO y NO₂ Puente Aranda para 2016



Fuente: Creación Propia con adaptación de RMCAB

Como está representado en el artículo de Galán y Fernández (2006) por Los óxidos de nitrógeno dominantes en emisiones provocadas por la combustión de la gasolina, el carbón y el gas natural son los monóxidos de nitrógeno (NO), este se oxida a dióxido de nitrógeno al entrar en contacto con oxígeno diatómico:



A través del día el NO₂ reacciona lentamente con moléculas de agua formando ácido nítrico y ácido nitroso, y al llegar a la atmósfera se reúne en las nubes dando origen a la precipitación de lluvia ácida (Resolución 1208 de 2003).



10.6 Comparación con la norma

Para la obtención de los datos se consultó la base de datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, donde se descargaron aquellos medidos por la estación de monitoreo de la localidad de Puente Aranda, para un periodo de 10 años comenzando desde enero de 2008 y finalizando en diciembre de 2018. Una vez descargados, se procedió a organizarlos con el formato hora-día-mes-año de forma descendente (tabla 6. y 7.).

Tabla 6. Datos meteorológicos promediados para el periodo de enero de 2008 hasta diciembre de 2018 en la estación de monitoreo de calidad del aire de Puente Aranda

Fecha	Vel Viento	Dir Viento	Precipitación	Temperatura	NOx	NO
Mes/Año	m/s	Grados	mm	°C	ppb	ppb
Enero - Diciembre de 2008	2,66	225,01	0,18	13,97	36,21	19,24
Enero - Diciembre de 2009	2,81	206,92	0,12	14,53	42,12	24,71
Enero - Diciembre de 2010	2,64	228,12	0,10	14,52	59,46	34,80
Enero - Diciembre de 2011	2,64	224,03	0,09	13,92	76,73	45,04
Enero - Diciembre de 2012	2,18	199,34	0,08	13,77	57,94	36,61
Enero - Diciembre de 2013	2,06	193,38	0,08	13,69	50,33	29,17
Enero - Diciembre de 2014	2,05	190,01	0,08	13,99	49,35	28,22
Enero - Diciembre de 2015	2,30	182,82	0,05	14,36	39,47	22,36
Enero - Diciembre de 2016	1,85	208,75	0,11	14,47	38,44	23,94

Fecha	Vel Viento	Dir Viento	Precipitación	Temperatura	NOx	NO
Enero - Diciembre de 2017	1,85	208,75	0,11	14,47	38,44	23,94
Enero - Diciembre de 2018	2,20	202,04	0,09	14,15	44,70	25,97

Fuente: IDEAM, 2019

Aquellos valores que no se encontraran en las mismas unidades fueron operados por su respectivo factor de conversión con el fin de obtener una homogeneidad en cuanto a unidad de medida para poder realizar de una manera más práctica el tratamiento de los datos. Dicha acción fue realizada para los contaminantes criterio, por medio de lo cual se obtuvieron los valores de la tabla 7. Se realizaron promedios para cada uno de los criterios a partir de las mediciones por hora de cada uno de los espacios.

Tabla 7. Contaminantes criterios promediados para el periodo de enero de 2008 hasta diciembre de 2018 en la estación de monitoreo de calidad del aire de Puente Aranda

Fecha	SO ₂	NO ₂	OZONO	CO	PM ₁₀	PM _{2,5}
Mes/Año	µg/m ³					
Enero - Diciembre de 2008	21,32	31,82	15,61	998,90	78,72	Sin datos
Enero - Diciembre de 2009	11,25	32,64	25,20	861,33	55,97	61,20
Enero - Diciembre de 2010	9,80	45,64	20,48	886,86	60,68	Sin datos
Enero - Diciembre de 2011	6,25	59,50	16,92	1132,97	55,63	Sin datos
Enero - Diciembre de 2012	5,37	40,00	17,35	1098,06	47,75	Sin datos
Enero - Diciembre de 2013	4,37	39,89	15,21	974,59	47,13	Sin datos
Enero - Diciembre de 2014	4,22	39,56	14,62	857,71	61,66	Sin datos

Fecha	SO ₂	NO ₂	OZONO	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}
Enero - Diciembre de 2015	3,11	31,93	17,40	809,00	52,03	Sin datos
Enero - Diciembre de 2016	4,01	27,18	11,83	864,61	46,66	18,00
Enero - Diciembre de 2017	4,01	27,18	11,83	864,61	46,66	18,00
Enero - Diciembre de 2018	2,85	35,36	11,60	849,46	43,22	16,95

Fuente: IDEAM, 2019

Con el fin de comparar los valores finales de cada año luego de realizado su respectivo promedio se evaluó la normativa nacional e internacional, la cual difiere en valores; si bien la nacional es más baja que la internacional, la anterior es la que se tiene en cuenta dentro del país a la hora de determinar la calidad del aire de las ciudades. Los niveles permisibles son entonces, mucho más laxos que los de la normativa extranjera de la Organización Mundial de la Salud (Tabla 8.).

Tabla 8. Normativa nacional e internacional para contaminantes criterio medida en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	NORMATIVA	
	NACIONAL	INTERNACIONAL
Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) con tiempo de exposición	
SO ₂	50 media en 24h 100 media 1 hora	20 media en 24h 500 media 10 min
NO ₂	60 media anual 100 media 1 hora	40 media anual 200 media 1 hora
CO	5000 media 8 horas 35000 media 1 hora	10000 media 8 horas 40000 media 1 hora

OZONO	100 media 8 horas	100 media 8 horas
PM ₁₀	50 anual 100 media en 24h	20 media anual 50 media en 24h
PM _{2.5}	25 anual 50 media en 24h	10 media anual 25 media en 24h

Fuente: Resolución 2254 de 2017; OMS 2018

Finalmente se realizó una comparación con la normatividad tanto nacional como internacional por medio del cálculo del índice porcentual de excedencias de la norma, donde se obtuvieron como las más altas los datos de PM₁₀ (100% excedencia) y PM_{2,5} (93% excedencia) bajo la normativa internacional.

Tabla 9. Promedio del índice porcentual de excedencias de la norma de calidad del aire

Variables para cálculo IP			Variables para cálculo IP		
ND	NE	Normatividad	ND	NE	Normatividad
132	3	Diario PM ₁₀ (Nacional)	128	0	1 Hora CO (Nacional)
2,272727273			0,00		
132	83	Anual PM ₁₀ (Nacional)	42,66666667	0	8 Horas CO (Nacional)
62,87878788			0,00		
132	83	Diario PM ₁₀ (Internacional)	N.A.		Diario CO (Internacional)
62,87878788					
132	132	Anual PM ₁₀ (Internacional)	N.A.		Anual CO (Internacional)

Variables para cálculo IP			Variables para cálculo IP		
ND	NE	Normatividad	ND	NE	Normatividad
100					
29	1	Diario PM 2.5 (Nacional)	130	0	Diario SO ₂ (Nacional)
3,448275862			0,00		
29	2	Anual PM _{2.5} (Nacional)	130	0	1 Hora SO ₂ (Nacional)
6,896551724			0,000000000		
29	2	Diario PM _{2.5} (Internacional)	130	6	Diario SO ₂ (Internacional)
6,896551724			4,615384615		
29	27	Anual PM _{2.5} (Internacional)	N.A.		Anual SO ₂ (Internacional)
93,10344828					
40,33333333	0	8 Horas O ₃ (Nacional)	110	0	1 Hora NO ₂ (Nacional)
0,00			0,000000000		
N.A.		Anual O ₃ (Nacional)	110	1	Anual NO ₂ (Nacional)
			0,909090909		
40,33333333	0	8 Horas O ₃ (Internacional)	110	0	Diario NO ₂ (Internacional)
0,00			0,000000000		

Variables para cálculo IP			Variables para cálculo IP		
ND	NE	Normatividad	ND	NE	Normatividad
N.A.		Anual O ₃ (Internacional)	110	11	Anual NO ₂ (Internacional)
			10,00		

Fuente: Resolución 2254 de 2017

Con base en los resultados, se observa que la media de emisiones registradas por la estación de Puente Aranda, perteneciente a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, cuenta con datos confiables, corroborados por investigaciones que afirman que las emisiones de SO₂, NO₂, Ozono y CO permanecen entre los niveles limitados por la normatividad nacional e internacional.

Por otro lado, las emisiones de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), que han sido registradas y evaluadas de los últimos 10 años, en promedio diario, según la normatividad nacional, no excedan los límites permitidos, pero por normatividad internacional, según su clasificación, pueden llegar a ser nocivos, por lo cual se puede inferir que la comunidad que está expuesta al ambiente atmosférico de Puente Aranda a diario puede sufrir continuamente de problemas en la salud. En cuanto a los promedios anuales, en ambos casos se exceden los límites establecidos por la normatividad (nacional e internacional).

Para el caso de la localidad, estos resultados implican que desde el año 2008 y a nivel de toda el área industrial dentro del distrito capital se incumple la norma anual local de PM₁₀ (50 µg/m³) en más del 60% de los días del año. Lo anterior explica el por qué las políticas de control ambiental y el mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad deben estar asociadas a mitigar dicho contaminante.

En el caso de emisiones de PM_{2.5}, es más complicado realizar un promedio y una sentencia, dado que, de acuerdo a los datos encontrados, no se realizó registro continuo de estos datos, los datos encontrados corresponden a menos del 50% del tiempo que fue evaluado; sin embargo, entre los promedios encontrados, a nivel nacional e internacional, a diario no se exceden los límites establecidos, pero a nivel internacional, se excedió más del 50% del tiempo el límite de emisión anual.

Para las emisiones de NO_x, SO_x, O₃ y CO las mediciones variaron con respecto al tiempo medio en que la normatividad estaba dada para la determinada sustancia. Si bien no ocurrió una excedencia importante en ninguno de estos casos, dichos contaminantes se tienen en cuenta debido a su naturaleza de contaminantes secundarios, los cuales tienen consecuencias sobre el cambio climático, el cual se asocia directamente con su incremento. Sumado a lo anterior, pueden ocurrir situaciones episódicas de contaminación atmosférica

asociadas a fenómenos meteorológicos de altas presiones y ausencia de lluvias prolongadas, incidiendo en la concentración de los contaminantes del aire y la atmósfera que se presentan en la zona. (Ballester, 2005).

Finalmente, en la mayoría de los casos (contaminantes atmosféricos), se observó que, según la normatividad internacional, se exceden continuamente los límites de emisión, principalmente por el flujo masivo del parque automotor (mayor contribuyente en el registro de emisiones en el área de Puente Aranda), contando con que el perteneciente al servicio público de movilidad ya no cumple con requerimientos dispuestos por la normatividad.

10.7 Colombia meteorología 1985-2018

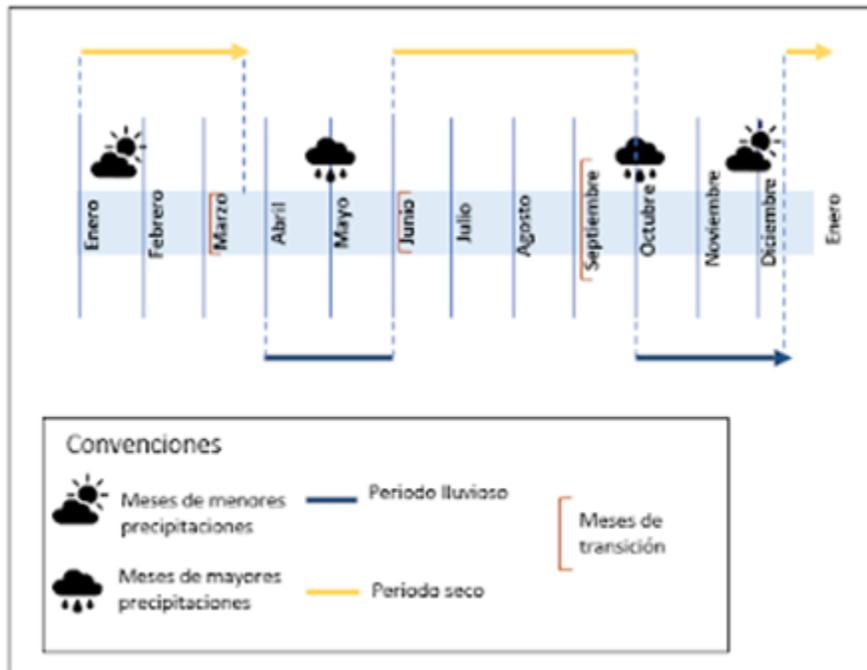
10.7.1 Precipitación

Sobre el comportamiento y características de la precipitación en el país influyen factores como el relieve, áreas boscosas, la circulación atmosférica y principalmente las corrientes de aire húmedo procedentes de los océanos Atlántico, Pacífico y de la región Amazónica, los cuales generan el mayor porcentaje de lluvias en el territorio (Jaramillo-Robledo, Chaves-Córdoba, 2000).

Dichos regímenes de precipitación se encuentran determinados a nivel macroclimático por la zona de confluencia intertropical (ZCIT), la cual es una franja de corrientes de aire húmedo y cálido procedentes de los cinturones de alta presión situados en la zona subtropical de los hemisferios norte y sur, dando origen a grandes masas de nubes y abundantes precipitaciones, al mismo tiempo, aquellas que no se encuentran bajo esta influencia presentan climas secos y cálidos (Jaramillo-Robledo, Chaves-Córdoba, 2000).

La cantidad de precipitación que se presenta mensualmente a nivel local está determinada por los sistemas de nubosidad asociados a la circulación local de cada vertiente y a su vez, está condicionada por la altitud, la orientación de las montañas (Jaramillo-Robledo, Chaves-Córdoba, 2000). Durante los últimos 30 años contando desde el año 2008-2018 no se han presentado cambios considerables, exceptuando los relacionados con el fenómeno de El Niño y La Niña, caracterizado por ser un periodo bimodal con dos periodos secos y dos lluviosos. (Dorado, Ruíz, s.f.) En la gráfica X. se pueden apreciar el comportamiento de la precipitación dependiendo de los meses de los que se tenga registro. Cabe aclarar que para la región Andina y Pacífica se maneja un régimen bimodal, régimen cuasi mono modal en la región Caribe y el régimen mono modal de las regiones Amazonia y Orinoquia (Pabón, Eslava, & Gómez, 2001).

Figura 34. Comportamiento de las precipitaciones en Colombia por meses en los últimos 30 años



Fuente: Creación Propia

De acuerdo con el documento del IDEAM (2017), la precipitación regional anual se caracteriza por lo siguiente:

- En la región Caribe, la distribución de las lluvias es de tipo bimodal principalmente en las zonas áridas, lo que significa que se presentan dos periodos lluviosos y dos secos en el transcurso del año. Los periodos lluviosos se dan, uno desde la segunda década de abril hasta la primera de junio y el segundo, con lluvias más abundantes, desde la primera década de septiembre hasta la primera década de diciembre. En cuanto a los periodos secos, el primero se da desde la segunda década de diciembre hasta fines de marzo y el segundo a mediados del año, normalmente entre junio y agosto.
- En la región Andina existe una distribución de lluvias compleja ya que depende de factores como la exposición y la orientación de la pendiente, la elevación y la localización geográfica. Por estas razones, en la mayor parte de la región la distribución de las lluvias es de tipo bimodal, presentando variaciones en la intensidad y la época en que ocurre diferenciando temporadas secas y lluviosas provocadas principalmente por la ubicación latitudinal.

En los periodos de altas lluvias resaltan las temporadas de altas precipitaciones que comienzan en la mitad de marzo y terminan hacia los primeros días de junio, nuevamente comienzan hacia finales de septiembre hasta primeros de diciembre. Destacan Antioquía y sectores del occidente

de Santander, con una estacionalidad poco marcada por lo que se registran lluvias más o menos frecuentes.

En Antioquia y sectores del occidente de Santander, la estacionalidad es poco marcada, de modo que las temporadas secas también registran lluvias más o menos frecuentes. Por el contrario, en el resto de la región, las temporadas secas de principio y mitad del año son mucho más marcadas y están mejor definidas. Sin embargo, se nota un efecto latitudinal según el cual en Huila, Valle, Cauca y Nariño la temporada seca principal se presenta hacia mitad de año, mientras en Tolima, Cundinamarca y los Santanderes la temporada seca principal tiende a concentrarse en diciembre, enero y febrero.

- Para la región Pacífica se presentan las zonas con mayores índices de lluvia en los sectores norte y centro. Si bien durante el año no presentan estacionalidad definida y se puede observar que los volúmenes de lluvia además de ser altos ocurren en todos los meses. Los niveles más bajos, a pesar de que sus cantidades siguen siendo considerables, se registran entre enero hasta marzo. Cabe resaltar que en el extremo sur se da una estacionalidad más evidente en sectores del litoral, registrando lluvias de agosto a noviembre.
- La orografía en la Orinoquía no presenta accidentes notables, permitiendo que se caracterice por ser un área homogénea con una distribución de temperaturas con valores mayores de 24°. Por su parte, la Amazonía presenta una fisiografía igualmente homogénea por lo cual las temperaturas no varían tampoco llegando a registrar temperaturas entre los 24° y los 28°C. En el piedemonte se registran entre 18° y 20°C. En los primeros cuatro trimestres se encuentra la mayor variación, ubicando el más frío en el Piedemonte Amazónico (Arango, et al., s.f.).

Para la región de la Amazorinoquia y específicamente hacia la Orinoquía, la distribución de lluvias que se presenta es de tipo mono modal destacando una intensa sequía estacional de diciembre y marzo. Los altos volúmenes e intensidades de lluvia se presentan en los meses de mayo-junio y julio. También se aprecia un incremento de lluvias en el mes de octubre hacia el piedemonte y centro de la región de la Orinoquía.

Por su parte en la Amazonía, generalmente la precipitación se manifiesta de forma abundante y con una gran intensidad. En cuanto a la distribución espacial ésta no presenta mucha variabilidad y las cantidades rondan entre 3.000 y 4.500 mm anuales. Las lluvias son uniformes en casi todo el territorio exceptuando el piedemonte donde se registra la temporada lluviosa entre abril y noviembre.

10.7.2 Temperatura

En la zona ecuatorial, la cantidad de energía que se recibe procedente del sol es casi la misma durante todo el año, por lo cual las temperaturas son más uniformes. Sin embargo, en el régimen térmico del país hay una alta variedad espacial como consecuencia de la fisiografía y la presencia de 2 océanos. Debido

a todos estos factores, en Colombia se presentan temperaturas entre los 32°C y 0°C o inferiores, distribuidas por todo el país (IDEAM, 2017).

Dependiendo de las condiciones orográficas de cada región, se presenta una notoria estacionalidad. Gran parte del territorio de Colombia se encuentra en zonas bajas cercanas al nivel del mar, cubre cerca del 70% del área total del país. Es por esto que la temperatura media anual de estos territorios se encuentra por encima de los 24°C. En el valle del Magdalena, donde se encuentran el Huila y Tolima, En el magdalena medio y bajo, así como en La Guajira, se alcanzan temperaturas medias anuales mayores a 28°C (IDEAM, 2018).

Por otra parte, en la región andina, dado que se encuentra mayor distribución de alturas, esta puede disminuir hasta los 5,53°C en promedio anual en los picos más altos. La temperatura media anual a partir de la mencionada aumenta 6,13°C por cada kilómetro de descenso, los máximos de temperatura se encuentran a mediados del primer y segundo semestre del año, mientras que las temperaturas mínimas se presentan a inicios, final y mitad del año (IDEAM, 2018).

Tal como lo describe el IDEAM (2017), el patrón de distribución de la temperatura media anual regional es este:

- La mayor parte de la región Caribe registra temperaturas medias que oscilan entre los 26 y 28°C. La Sierra Nevada de Santa Marta presenta su propio régimen de temperatura, con gradientes de 0,5°C/100 metros.
- En la región Andina, dada la orografía de la región, cada piso térmico representa un papel importante en el comportamiento de la temperatura. La temperatura más alta se registra en las regiones de menor altura y las menores en las alturas más altas. Las temperaturas medias más altas alcanzan hasta los 24 y 28°C, en los valles de los ríos Magdalena, Cauca, Sogamoso y Patía. Por otro lado, en los altiplanos cundiboyacense, nariñense y en las zonas montañosas de Antioquia, se presentan temperaturas entre 12 y 16°C. Finalmente en la alta montaña se alcanzan temperaturas inferiores a 8°C.
- En la región Pacífica, no se presenta variabilidad de temperaturas medias. Entonces las temperaturas únicamente oscilan entre los 24 y 28°C, las menores temperaturas se registran al sur de la costa pacífica y las mayores, se registran el extremo norte.
- En la Orinoquía, no existen accidentes orográficos notables, siendo bastante homogénea la distribución de temperatura la cual presenta valores mayores a los 24°C. La Región Amazónica, también se caracteriza por tener una fisiografía muy homogénea y por tanto las temperaturas poco varían espacialmente. En la mayor parte del territorio de la Amazonía se registran valores entre 24 y 28°C. Hacia el piedemonte los registros oscilan entre 18 y 20°C, en dependencia de la elevación. En el Suroriente Amazónico, las temperaturas medias del aire presentan una marcha casi uniforme. En este sector se encuentra la variación en los primeros cuatro trimestres, ubicándose más frío el Pie de Monte Amazónico en forma extensiva (Arango, et al., s.f.).

10.7.3 Humedad Relativa

Meteorológicamente hablando, se conoce como “aire húmedo” a la mezcla de aire seco con vapor de agua. Cabe destacar que la humedad del aire en forma de vapor es el origen de las precipitaciones que junto con otras variables provocan variaciones temporales. Por su parte, la humedad relativa corresponde a la relación porcentual entre la masa de vapor contenida en un volumen de aire y la que tendría el mismo

volumen si estuviese saturado a la misma temperatura. Tiene una variación entre 0 y 100 y se expresa en porcentaje (%) (IDEAM, 2017).

La humedad relativa en Colombia en los últimos 30 años se encuentra entre de 60 a 90% teniendo en cuenta todas las regiones lo cual nos permite considerar a Colombia como un país en su mayoría húmedo (IDEAM, s.f.). Los valores más altos (mayores de 85%), se presentan en la mayor parte de las regiones Pacífica y Amazonia, como resultado de las altas precipitaciones y evaporación en dichos lugares. En la región Andina, Caribe y Orinoquía la humedad relativa oscila entre 75% y 85%, mientras que en la región Caribe (La Guajira, cuenca del Cesar), región Andina (alto Magdalena, núcleos aislados del alto Cauca y cuenca del río Chicamocha) y hacia el norte de la Orinoquia se registran los menores valores (inferior a 75%). Cabe destacar que las laderas de la región Andina son las que presentan mayor variabilidad debido a la elevación (IDEAM, s.f.).

Debido a que cada una de las regiones presenta diversos patrones de humedad es pertinente abordar a cada una individualmente como se describe a continuación (IDEAM, 2017):

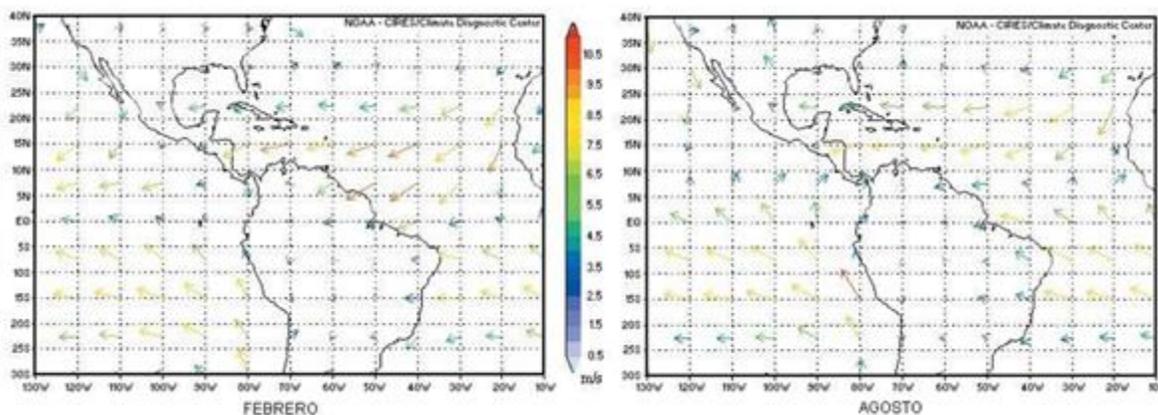
- En la región Caribe se presenta humedad de comportamiento bimodal, sobre todo en la alta y media Guajira. Las bajas humedades se dan en los meses de junio, julio y agosto; enero y febrero con valores entre los 60% y 70%. Las humedades altas se dan en época de lluvias, principalmente en los meses de octubre y noviembre con valores que alcanzan a exceder el 80%. Por su parte los valores mensuales a lo largo de un año con comportamiento habitual pueden fluctuar en promedio entre los 65% y 85%.
- La región Andina es de tipo bimodal también con diferencias aproximadas de 10% a 15% entre los meses más húmedos y más secos. Los de menor humedad normalmente son julio y agosto, aunque en la zona de Santander y el altiplano cundiboyacense estos valores se pueden dar entre enero y febrero. Los meses de la segunda temporada de precipitaciones coinciden con los meses de humedades máximas.
- En la región Pacífica la humedad del aire es constante durante todo el año con un promedio de 85%. Allí esta variable tiende a denotar valores ligeramente más altos hacia fin de año.
- En la Orinoquía la humedad es mono modal. Los menores valores medidos están en rangos de 60% a 65% en los meses de enero a marzo. Luego incrementa en abril y mayo hasta llegar a valores máximos en los meses de junio y julio. La transición a los valores bajos se da en diciembre el cual llega en descenso desde agosto.
- En la Amazonía, la humedad es consistente con valores cercanos a la saturación (más de 85%) a lo largo del año. Como consecuencia de las lluvias que se presentan sobre el Trapecio Amazónico se registran descensos de la humedad relativa hacia mitad del año. Cerca del piedemonte la humedad presenta variabilidad oscilando entre un mínimo de 75% de enero a febrero y máximo de 85% en junio y julio.

10.7.4 Vientos

Colombia, al encontrarse la zona intertropical, como posición estratégica, desarrolla vientos provenientes del noreste y del sureste, denominados vientos alisios, los cuales en consecuencia del efecto Coriolis provoca el enfriamiento del aire por expansión. Esto favorece la condensación, la producción de nubes y, por lo tanto, la alta frecuencia de lluvias sobre el territorio del país (CIOH, 2010).

Los vientos alisios se extienden en los cinturones de altas presiones subtropicales y bajas ecuatoriales. De acuerdo con la topografía de Colombia, la dirección y velocidad de los vientos varía, dado que los alisios convergen sobre una estrecha zona a lo largo del ecuador (Zona de Confluencia Intertropical), donde el aire y las precipitaciones se elevan y la inversión se debilita (CIOH, 2010). La velocidad de los vientos dominantes tiende a crecer con la altitud, debido a la reducción de la fricción con el suelo (IDEAM, 2005).

Figura 35. Campos medio del viento en superficie para los meses de febrero y agosto, con base en los datos del Reanalysis NCEP/NCAR, para el periodo 1968-1996.



Fuente: CIRCULACIÓN GENERAL DE LA ATMÓSFERA EN COLOMBIA. CIOH (2010).

Durante el transcurso del año, la circulación del viento es bastante definido. Influenciado por el comportamiento típico de los alisios sobre superficies planas como la llanura del Caribe, la Orinoquía y la Amazonía. En las zonas montañosas y en los valles interandinos, las condiciones fisiográficas determinan en gran medida la dirección y el flujo del viento, con una ligera influencia de los alisios (IDEAM, 2017).

Debido a las particularidades geográficas del territorio nacional y a la estacionalidad de sus diferentes sistemas, el IDEAM (2017) afirma que el viento fluye en diferentes direcciones sobre las áreas continental y marítima:

1. En la región Caribe, se encuentra el predominio de vientos del norte y del este a lo largo del año. En la temporada del fenómeno del niño, aumenta la velocidad del viento de manera particular, mientras que, en el fenómeno de la niña, la velocidad disminuye.

2. En la región andina, se encuentra un patrón de comportamiento sobre las regiones de la montaña, asociado al flujo típico de los vientos alisios, recurrentes durante todo el año.
3. En la región Orinoquía, el viento fluye hacia el norte entre los meses de octubre y marzo, mientras que entre mayo y agosto se torna hacia el sur. En los meses restantes (abril y septiembre), existe una transición de cambio entre los 2 patrones normales dejando que ingrese viento del este. En la temporada del fenómeno del niño, aumenta la velocidad del viento de manera particular, mientras que, en el fenómeno de la niña, la velocidad disminuye.
4. En la Amazonía domina el flujo del norte durante el octubre y enero, desde febrero se observa el ingreso del componente este y se extiende hasta abril. Desde mayo, hay flujo del viento del sur, hasta agosto y finalmente en septiembre se desplaza el viento hacia el oriente. En la temporada del fenómeno del niño, aumenta la velocidad del viento de manera particular, mientras que, en el fenómeno de la niña, la velocidad disminuye.
5. En la región pacífica sólo se encuentra un patrón de comportamiento al año, dominado por las corrientes del sur y del oeste. Durante el fenómeno del niño, la velocidad del viento tiende a disminuir, y durante el fenómeno de la niña, la velocidad del viento incrementa en zonas de menor elevación.

10.8 Colombia 2009 – 2011

Como se observa en la figura anterior, en los años 2009 y 2010 se presentó un episodio del fenómeno El niño. El clima de estos años se vio caracterizado por periodos extremos relacionados a las condiciones fluctuantes del Pacífico tropical. El año 2009 terminó bajo el efecto moderado de El Niño, desde junio, el cual se mantuvo hasta el mes de mayo del siguiente año (León, 2010).

Después de la finalización del fenómeno de El niño en el 2010, se dio paso en junio al inicio del fenómeno de La Niña, el cual duraría hasta mayo del 2011. Hasta mediados de julio de 2010 se registraban condiciones próximas a temperaturas comunes, a partir de ese momento se registró el descenso de la temperatura hasta $-1,4^{\circ}\text{C}$, de allí en adelante, se mantuvieron oscilaciones cercanas a este valor como promedio. Hasta finales de febrero del 2010, prevalecen vientos ligeros del Oeste en condiciones normales sobre el Pacífico tropical, después de comenzado el fenómeno de la niña, se presentó mayor intensidad en los vientos del Este, con velocidades de hasta 8 m/s, los cuales se debilitaban a medida que terminaba el periodo del fenómeno (Euscátegui y Hurtado, 2011).

El mes de julio de 2010 fue el más lluvioso reportado durante última década de tal época. Los registros de precipitación fueron mayores con respecto a otros fenómenos de la niña previos. La lluvia excesiva dio lugar a inundaciones, deslizamientos y movimientos en masa que ocasionaron desastres de extraordinarias proporciones en el territorio nacional, particularmente en las regiones Caribe y Andina, razón por la cual el gobierno decretó emergencia invernal en 28 de 32 departamentos (León, 2010).

Según el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres, la temporada invernal dejó a más de 1500000 personas afectadas. Las inundaciones fueron más fuertes en zonas rurales, pueblos aislados de comunidades indígenas y afrocolombianas, estas mismas causaron dificultades en el acceso a zonas rurales y afectaron gravemente las grandes áreas de cultivos y ganadería, deteriorando, asimismo, los precarios medios de vida de estas poblaciones. De igual manera se reportaron casos de diarrea, infecciones respiratorias y de la piel en municipios afectados por inundaciones (OCHA, 2010).

10.9 Colombia 2015-2016

Según El Tiempo (2016), el fenómeno de El Niño ocurrido entre los años 2015 y 2016 fue uno de los más fuertes registrados de la historia del planeta, ya que, en Colombia, se perdieron, a causa de incendios forestales, más de 188600 hectáreas de bosques. En medio de la sequía, el río Magdalena alcanzó niveles históricos de escasez, lo que ocasionó que más de 200 municipios perdieran abastecimiento de agua.

El fenómeno de El Niño alcanzó su máxima intensidad hacia finales de 2015, manteniéndose fuerte durante enero y febrero del siguiente año. En la región andina se presentaron déficits de lluvia entre el 20 y 50% (IDEAM, 2016).

Por otro lado, el Glaciar Santa Isabel se vio fuertemente impactado debido a la escasa, casi nula, cobertura de nieve y a la ceniza volcánica acumulada sobre la superficie de esta, proveniente del Nevado del Ruiz. El glaciar de Santa Isabel perdió espesor de superficie de al menos 7 metros. De igual manera, el Glaciar Conejeras perdió 33% de su volumen durante el fenómeno (IDEAM, 2016).

De acuerdo con el IDEAM (2016), durante estos meses las lluvias se redujeron entre el 30 y el 40 por ciento y en promedio el 80 por ciento de las zonas con influencia de El Niño, aumentó la temperatura cerca de 2.5 grados Celsius. En las zonas montañosas de Colombia, se manifestó una disminución de la precipitación de hasta 57% y un aumento de temperatura de hasta 47%.

10.10 Datos de entrada

Para entrar en contexto con los mapas que fueron realizados en HYSPLIT, en primer lugar, se seleccionaron datos de los últimos 30 años, encontrados en las bases de datos de la NOAA NCEP/NCAR para la movilización de la meteorología a nivel atmosférico y posteriormente, hojas de cálculo con representación de meteorología a nivel local proporcionadas por la estación ubicada en Puente Aranda de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. Por otro lado, se realizó una observación de la localidad estudiada, donde se localizaron las zonas industriales y las empresas que producen mayor cantidad de emisiones (Figura 10.). A partir de estos datos, se realizó la descripción de la topografía y la selección de alturas apropiadas para representación de estos teniendo en cuenta que el principio básico de la definición de cuencas consiste en encontrar las direcciones preferenciales de las trayectorias dentro de los primeros 1000 metros sobre la superficie (aproximación de capa límite).

Tabla 10. Descripción de los datos de entrada de HYSPLIT

Datos de Entrada	Descripción
Fichero meteorológico: Reanálisis NCEP/NCAR	Movimiento atmosférico de factores meteorológicos
Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá	<ul style="list-style-type: none"> ● Meteorología local y comportamiento del viento a alturas más bajas ● Concentración de contaminantes producidos en el área de estudio
Emplazamiento	Identificación de la topografía y de puntos de mayor generación de contaminantes en la localidad
Meteorología	<ul style="list-style-type: none"> ● Temperatura del aire ● Velocidad y dirección del viento ● Precipitación ● Humedad Relativa
Factores de modelación	<ul style="list-style-type: none"> ● Meses: <ul style="list-style-type: none"> ○ Diciembre de 2010 (Fenómeno La Niña) ○ Diciembre de 2015 (Fenómeno El Niño) ○ Junio de 2016 (Condiciones meteorológicas normales) ● Alturas: <ul style="list-style-type: none"> ○ 500m (Dispersión a nivel local) ○ 750m (Dispersión por encima de los obstáculos topográficos) ○ 1000m (Dispersión hacia la atmósfera y en la parte superior bajo la capa límite) ● Intervalo Cada 6 horas por 30 días

Fuente: Creación Propia

10.11 Ejecución de HYSPLIT

Una vez aportados y procesados los datos meteorológicos de los ficheros de datos de reanálisis es posible generar la ejecución del software de HYSPLIT, el cual se realizó por medio de clúster ya que fue necesario realizar simulaciones en paralelo (González, 2009). Los cálculos secuenciales de trayectorias se realizaron durante 30 días de los meses de diciembre del año 2010, diciembre del año 2015 y junio del año 2016 en intervalos de 6h UTC buscando la representación de la variabilidad diaria de las parcelas de aire seleccionadas partiendo de la localidad de Puente Aranda en las coordenadas de 4,73 N - 74,25 W,

y con análisis de trayectorias hacia adelante (forward) ya que por medio del estudio se busca conocer el destino de dichas corrientes de aire. Con la finalidad de conocer el tipo de masas de aire y las trayectorias de estas que se desplazan por Capa Límite Atmosférica (ABL), cada una fue calculada diariamente a tres alturas distintas: 500 m, 750 m y 1000 m.

Las alturas utilizadas en el modelo fueron seleccionadas de tal manera que todavía fuera posible que se dispersen los contaminantes seleccionados para la investigación, porque en el momento en el que el viento alcanza y sobrepasa la capa límite atmosférica (PBL) es posible que el contaminante examinado no atraviese la capa o que en el modelo de las trayectorias no se contemple hasta dónde llega el contaminante por las largas distancias que recorre el viento proveniente del punto de partida. Es por eso que, para la altura de 500 m sobre el nivel del suelo, se quiso observar la dispersión a nivel local, dadas las alturas del relieve que rodean el punto de partida. En la altura de 700 m, estando ya sobre algunas de las formaciones montañosas se deseó observar hasta qué distancias llega el contaminante sobre el territorio nacional. Finalmente, la altura de 1000 m sobre el nivel del suelo fue utilizada para alcanzar la altura junto a la capa límite atmosférica y donde la fricción contra el suelo es cercana a 0, entonces la dirección y la velocidad del viento aumentan y la dispersión alcanza mayores rangos de distancia.

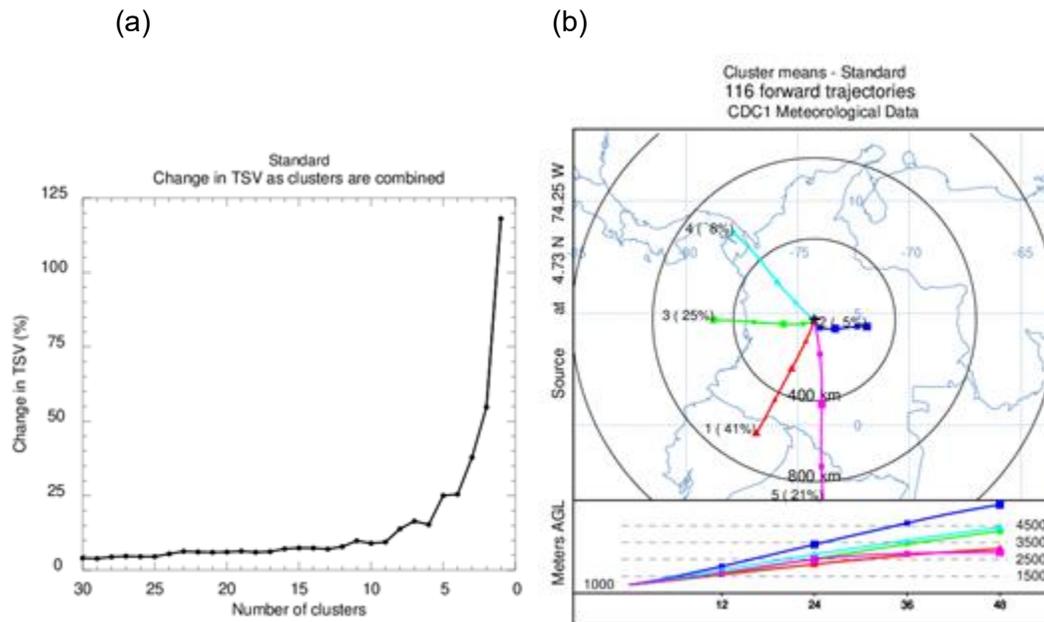
Por medio de la técnica de clúster es posible agrupar un gran volumen de información para poder comprenderla de una forma más simplificada basándose en variaciones de la varianza total entre clúster (TSV, “Total Spatial Variance”), de igual forma que de la varianza entre cada uno de los elementos que los componen (SPVAR, “Spatial Variance”) (Hernández, 2012, Draxler et al., 2009). El proceso de agrupación se refiere a la unión de pares de trayectorias o clúster (conglomerados) que generen un mínimo incremento de ambos índices, finalizando con la conformación de un único clúster el cual contiene todas las trayectorias iniciales (Hernández, 2012).

10.12 Datos de salida

Como resultado de la ejecución y la simulación en el software HYSPLIT, se da como salida un fichero binario junto con los resultados generados, los cuales se abren en el programa GSview los cuales pueden convertirse a formato de imagen JPG o PNG. Los grupos o clúster están numerados con porcentajes que representan la cantidad de trayectorias hacia adelante que coincidieron hacia dicha dirección. Como es posible observar en la Figura 36., para definir el número óptimo de clúster a emplear en la simulación se tuvieron en cuenta donde se comenzó a ver mayor varianza en el eje “y” correspondiente a la varianza total del índice TSV con respecto al clúster (Stunder, 1996), dando como resultado 5 trayectorias para todas las parcelas de aire evaluadas. Los datos obtenidos y las gráficas son analizados desde la perspectiva del desplazamiento y la altura que alcanzan a lo largo de la localidad de Puente Aranda.

Como ejemplo, en la Figura 36., es posible notar la evolución del proceso durante las últimas 30 etapas para la serie del mes de diciembre del 2010 con trayectorias calculadas a una altura de 1000 m (AGL). Los colores de cada una de las trayectorias representan la trayectoria media de cada grupo de datos.

Figura 36. (a, b). Variación de la varianza total entre clústeres (TSV) durante las últimas 30 etapas, correspondientes a las trayectorias calculadas a 1000 m en el año 2010, en la cual se emplearon un total de 116 trayectorias. b) Recorrido de los centros de los c



10.13 Configuración metodológica de la cuenca

El esquema metodológico propuesto por Iniestra y Caetano (2008) permitió definir la cuenca atmosférica basados en la dirección preferencial que tomaron las trayectorias de masas de aire teniendo en cuenta también la interacción de la circulación del viento y la superficie junto con criterios de meteorología y topografía, así como de fuentes emisión de sustancias contaminantes del aire y atmósfera y la salud de la población. Se propone además el uso se trayectoria hacia adelante (forward) en parcelas de aire tomadas en superficies cercanas a zonas urbanas, las cuales deben estar arregladas simétricamente en mallas a distancias de 5 km de separación.

Las zonas emisoras serán entonces los lugares de donde se genere contaminación atmosférica, en este caso la zona industrial y zona urbana donde haya vías principales por donde transite alto flujo de fuentes móviles como carros y buses. Los emplazamientos fueron definidos en periodos máximos de 24 horas con el fin de analizar la dispersión de las trayectorias y el desplazamiento del radio con respecto al espacio seleccionado y el tiempo definido. Para las trayectorias fueron seleccionadas alturas de hasta 1000 m las cuales están próximas a la capa límite para finalmente establecer polígonos o centros concéntricos a distancias iguales, alrededor de las zonas elegidas para comenzar a dar una estructura adecuada a la cuenca atmosférica (Iniestra & Caetano, 2008), tal y como se puede apreciar en la figura X.

Posteriormente se identificó la densidad de concentración en cada una de las parcelas excluyendo aquellas trayectorias que no están dentro del umbral definido por el porcentaje denominado "m" que son el número de parcelas que terminan en una región y "n" que son el total de parcelas soltadas (m/n) %. De acuerdo con Iniestra & Caetano (2008), para establecer la estructura de la cuenca se observa la agrupación de los puntos que van a lo largo de las trayectorias que se dieron como resultado de la

implementación de la técnica de clúster de modo que se establezca finalmente la cuenca atmosférica con foco proveniente de la localidad de Puente Aranda.

10.13.1 Siembra y descripción de parcelas de aire

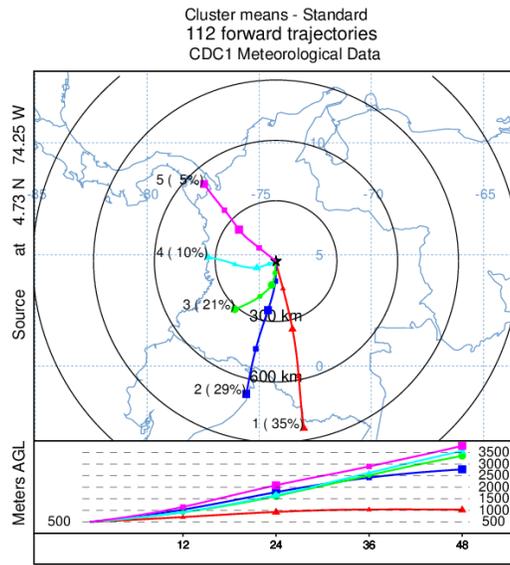
Realizando el análisis de los factores meteorológicos característicos de Bogotá y Colombia y revisando la dinámica de los contaminantes atmosféricos que fueron registrados como presentes por la estación de monitoreo de Puente Aranda, se establecieron escenarios con ayuda de HYSPLIT para realizar el mapeo de las posibles trayectorias del viento tomando como origen la localidad. De acuerdo a esta actividad, se eligieron los periodos de diciembre del 2010, diciembre del 2015 y junio del 2016 para estudiar la dirección y capacidad de las trayectorias en presencia del fenómeno El Niño, La Niña y clima normal.

En total se obtuvieron 1008 trayectorias para todos los mapas que serán presentados más adelante, se identificaron al tomar 30 días de cada mes, programando la ejecución de captación de datos cada 6 horas durante todo el día. Con los datos tomados de cada mapa, se definieron los límites preliminares de la cuenca atmosférica, teniendo en cuenta únicamente las 2 frecuencias de cada mapa que tienen mayor porcentaje de frecuencia.

Adicionalmente, en el mes de diciembre de 2010 las emisiones registradas por la estación meteorológica de Puente Aranda fueron las más altas de todo el periodo comprendido entre el año 2010 y 2011 por lo tanto es en este mes donde se puede esperar que haya más desplazamiento del contaminante PM_{10} y en mayor cantidad. Para el mes de diciembre de 2015, hubo una concentración del contaminante PM_{10} media ($50 \mu\text{m}^3$) en comparación con la norma por lo que es probable que dicha sustancia se haya mantenido retenida ya que al presentarse por un largo periodo el Fenómeno El Niño, se pudieron dar condiciones desfavorables para la dispersión del material particulado. En junio de 2016 se estaba dando la transición de ambos fenómenos entonces al presentarse condiciones estables y una concentración de material particulado baja tuvo una gran dispersión debido a la velocidad de los vientos acelerada.

Para el mes de diciembre del 2010, en cuanto a la altura de 500 AGL, se representaron las 5 trayectorias que tienen más frecuencia, realizando un muestreo en el programa que determina cuántas frecuencias tienen mayor valor. Entre las 5 frecuencias, se encuentran 2 predominantes que tienen porcentaje de 35% (trayectoria 1) y 29% (trayectoria 2), con dirección hacia el sur y hacia el suroeste respectivamente. Se puede observar (figura 37.) que tanto la trayectoria 1 y la 2 atraviesan la frontera de Colombia, la primera llega a las amazonas de Perú, mientras que la trayectoria 2 termina en las fronteras entre Perú y Ecuador. Por otra parte, teniendo en cuenta las trayectorias con mayor frecuencia, estas alcanzan alturas de elevación del viento de 1000 AGL (trayectoria 1) y más de 1500 AGL (trayectoria 2). Ambas frecuencias alcanzan un desplazamiento de hasta 900 Km sobre la superficie terrestre.

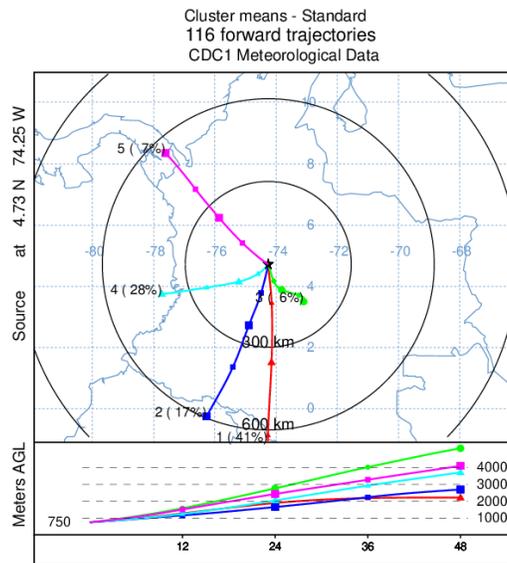
Figura 37. Representación de las trayectorias de masas de aire a 500 m de altura en diciembre del 2010



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

En la representación de trayectorias a 750 AGL de diciembre del 2010 (Figura 38.), igualmente se seleccionaron 2 trayectorias que tienen mayor porcentaje de frecuencia, estas son la frecuencia 1 y la frecuencia 4, con porcentajes respectivo de 41% y 28% y dirección sur y oeste. La frecuencia 1 atraviesa la frontera entre Colombia y Perú; la frecuencia 4 llega hasta el departamento del Chocó, en límites terrestres y termina en el Océano Pacífico. Ambas frecuencias alcanzan alturas entre 2000 y 4000 AGL. La frecuencia 1 tiene capacidad de desplazamiento de 700 Km sobre la superficie terrestre, mientras que la frecuencia 4 se desplaza hasta el mar a distancia de 450 Km.

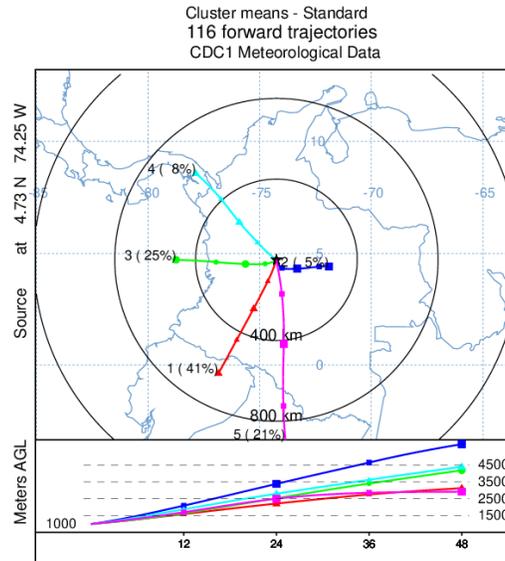
Figura 38. Representación de las trayectorias de masas de aire a 750 m de altura en diciembre del 2010



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

Entre las trayectorias representadas a 1000 AGL de diciembre del 2010 (Figura 39.), la trayectoria 1 (41%) y la trayectoria 3 (25%) representan más frecuencia que las demás graficadas, estas recorren alturas entre 3000 y 4500 AGL y se desplazan horizontalmente a 600 y 650 Km de distancia respectivamente. La trayectoria 1 alcanza la frontera de Colombia y Ecuador en dirección suroeste, y la trayectoria 2 pasa el departamento de Chocó y termina en el Océano Pacífico a mayor distancia que la trayectoria 4 del anterior mapa, con dirección oeste.

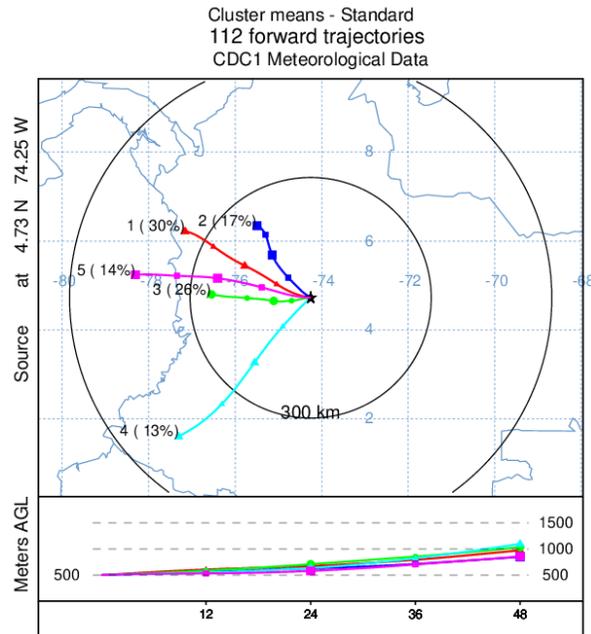
Figura 39. Representación de las trayectorias de masas de aire a 1000 m de altura en diciembre del 2010



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

Para el mes de diciembre del año 2015 (Figura 40.), se obtuvieron 336 trayectorias cuya distribución se dio en mayor medida hacia el noroeste y suroeste presentando los porcentajes más altos en la trayectoria 1 y 3 con valores de de 30% y 26% respectivamente para la altura de 500 ARGL. Dichas trayectorias alcanzan distancias hasta el departamento del Chocó entre aproximadamente 300 y 350 km de distancia.

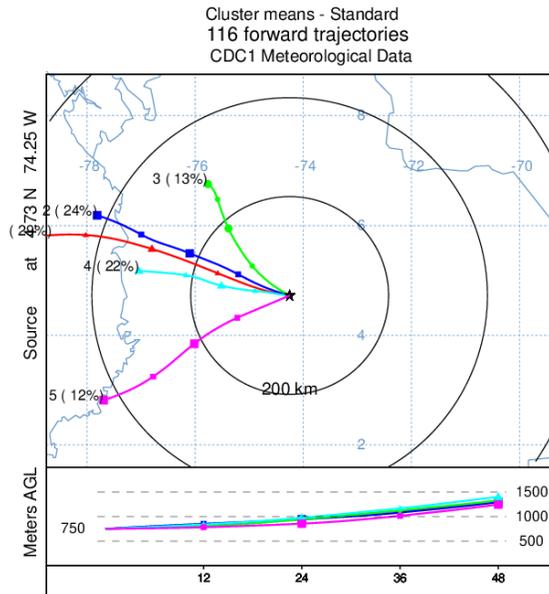
Figura 40. Representación de las trayectorias de masas de aire a 500 m de altura en diciembre del 2015



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

Entre las trayectorias representadas para 750 AGL de diciembre del 2015 (Figura 41.), la trayectoria 1 (29%) y la trayectoria 2 (24%) representan más frecuencia que las demás generadas, estas se desplazan horizontalmente a 450 Km de distancia y alcanzan alturas de 1000 m respectivamente. La trayectoria 1 y 2 alcanzan el Océano Pacífico a mayor distancia que las trayectorias del anterior mapa, con dirección noroeste.

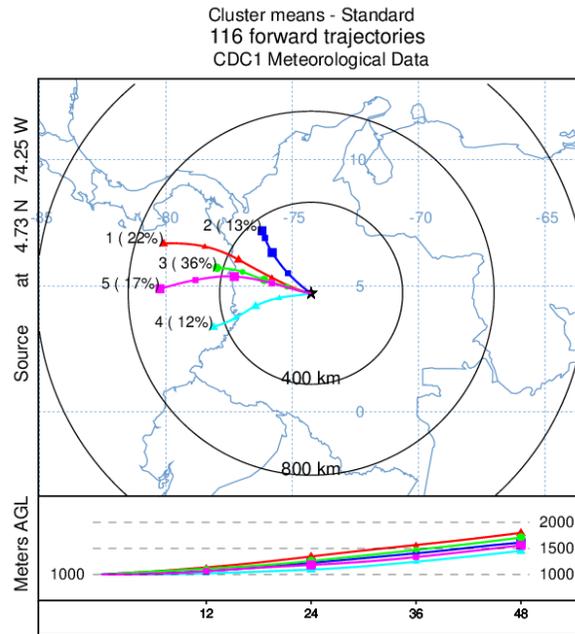
Figura 41. Representación de las trayectorias de masas de aire a 750 m de altura en diciembre del 2015



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

Por su parte, para la altura de 1000 ARGL en el mes de diciembre del año 2015 (Figura 42.) se presentaron las trayectorias 1 y 3 como las de porcentajes más altos (22% y 36% respectivamente), con distancias horizontales de aproximadamente 400 km y 750 km, llegando a alturas de entre 1500 y 2000 metros hacia la atmósfera. Las dinámicas de los vientos favorecieron que la simulación arrojará direcciones hacia el noroeste llegando hasta el Océano Pacífico y atravesando departamentos como Tolima, Caldas, Risaralda, Antioquia y Chocó.

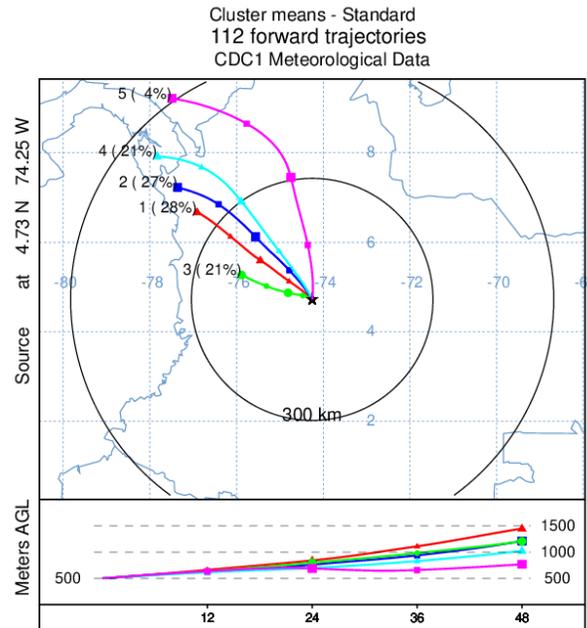
Figura 42. Representación de las trayectorias de masas de aire a 1000 m de altura en diciembre del 2015



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

Entre las trayectorias de masas de aire a 500 AGL de junio del 2016 (Figura 43.), se encontró que todas tienen dirección al noroeste, las trayectorias 1 (28%) y 2 (27%) representan las mayores frecuencias. La frecuencia 1 alcanza altura de 1500 AGL, tiene distancia de dispersión de 400 Km que termina a los alrededores del páramo Frontino. Entre tanto, la frecuencia 2 se eleva a 1200 AGL y se desplaza horizontalmente 400 Km, este desplazamiento termina más o menos entre Riosucio y la Serranía del Darién.

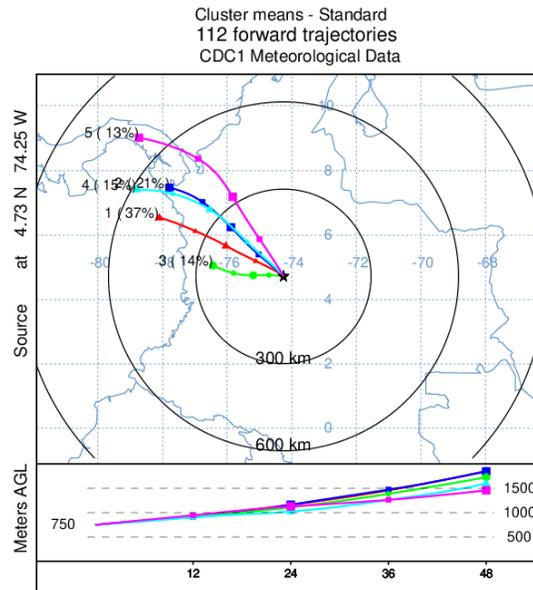
Figura 43. Representación de las trayectorias de masas de aire a 500 m de altura en diciembre del 2016



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

A 750 AGL se presentaron trayectorias provenientes de Puente Aranda en junio del 2016 (Figura 44.), entre las cuales la trayectoria 1 de 37% de frecuencia, se dispersa al Noroeste del país, con alcances de 2000 AGL y 500 Km de distancia horizontal, llegando al Océano Pacífico atravesando el Parque Nacional Natural Utría. Además, la trayectoria 2, de frecuencia 21%, llega también a 2000 AGL y 500 Km de distancia, se desplaza hacia el Nororiente de Colombia y se encuentra con la frontera entre Colombia y Panamá en la Sierra del Darién.

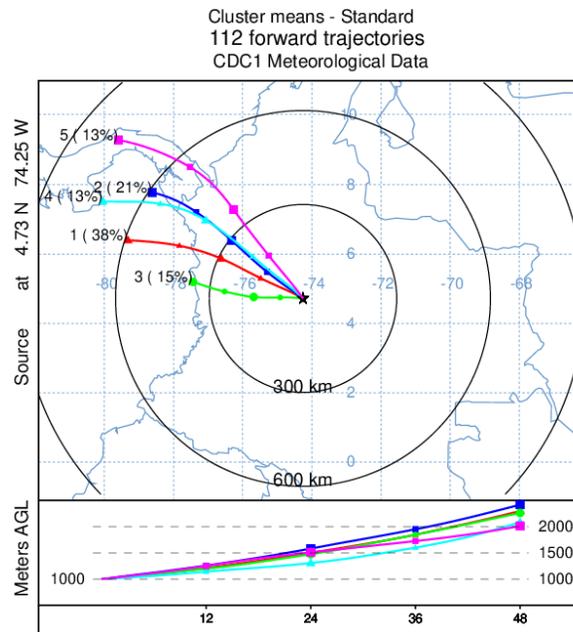
Figura 44. Representación de las trayectorias de masas de aire a 750 m de altura en junio del 2016



Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

Finalmente, en dirección predominante Noroccidental se representaron las trayectorias de masas de aire a 1000 AGL en junio del 2016 (Figura 45). Por consiguiente, las trayectorias con mayor frecuencia fueron la 1 (38%) y la 2 (21%). las dos trayectorias recorren horizontalmente 600 Km de distancia desde el punto de partida y alcanzan alturas similares entre 2000 y 2500 AGL. Ambas trayectorias resultan en el Océano Pacífico en diferentes puntos, limitando con los mares de Panamá.

Figura 45. Representación de las trayectorias de masas de aire a 1000 m de altura en junio del 2016

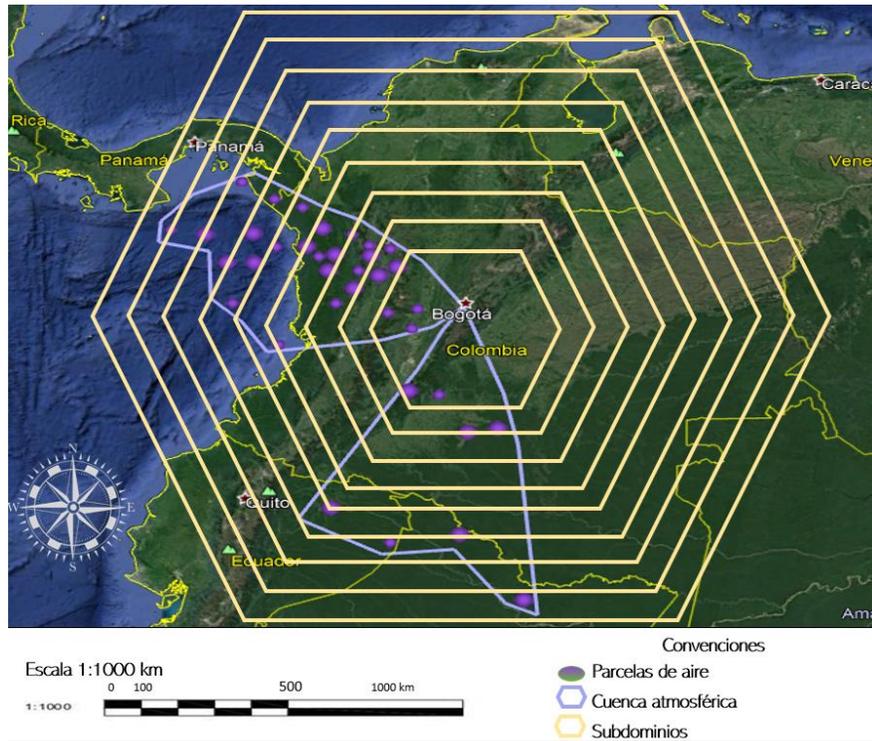


Fuente: Creación Propia con uso de HYSPLIT

10.14 Configuración preliminar de la cuenca

A través del análisis de los clústeres realizados con HYSPLIT, se pudieron reconocer las frecuencias entre las cuales las trayectorias del viento se concentran en la misma dirección y alcanzan la misma altura de elevación. A partir de esto, se seleccionaron las trayectorias que tienen mayor proporción de influencia en el direccionamiento de cada clúster trazado. Consecuentemente se construyó un patrón de cuenca que demuestra los posibles límites de esta.

Figura 46. Cuenca conformada por subdominios

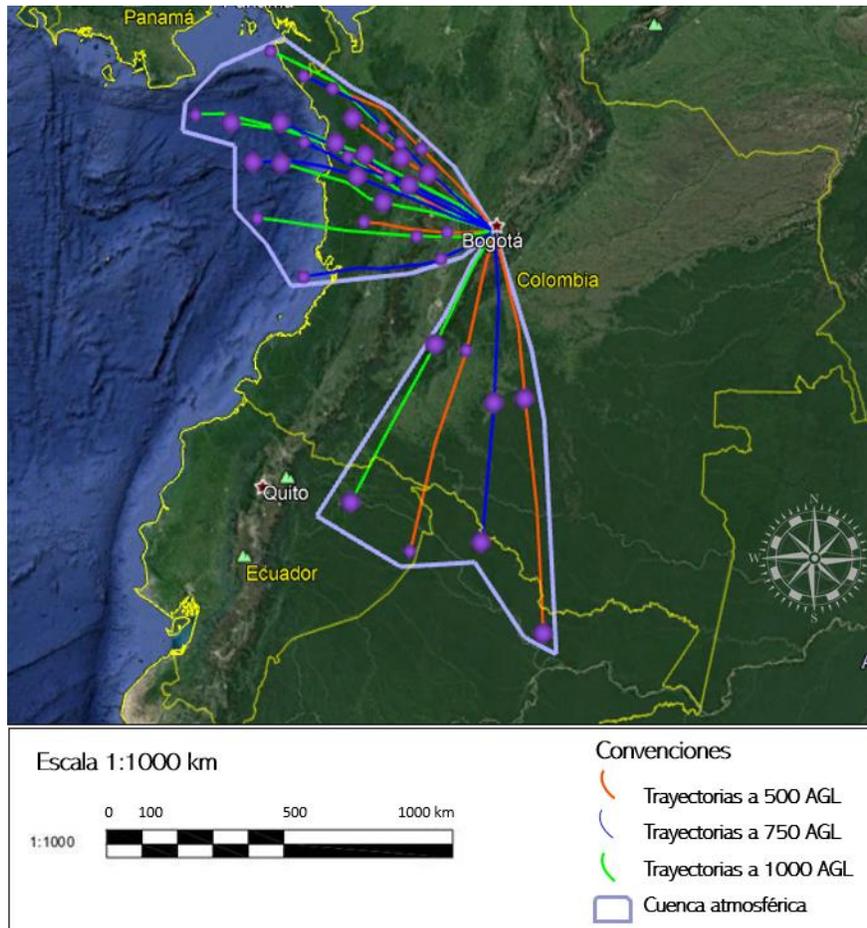


Fuente: Creación Propia con adaptación de Google Earth

Al observar el patrón de las trayectorias observadas, se determinó que es el departamento de Chocó, junto al océano Pacífico, el territorio donde se distribuyen con mayor frecuencia los vientos provenientes de Bogotá. Sin embargo, se observó que igualmente, para diferentes condiciones atmosféricas, se debe tener en cuenta otras trayectorias de gran porcentaje de influencia para sus clústeres. Gracias a estas se estableció igualmente que algunas trayectorias que se dirigen hacia el sur atraviesan las fronteras y se dirigen hasta Ecuador y Perú. Para realizar el trazado de la cuenca, se seleccionaron trayectorias que, con un porcentaje mayor de 20% de incidencia, tienen la capacidad de establecer los límites probables de la cuenca.

Para la construcción del polígono de la cuenca, se trazaron puntos concéntricos de cada trayectoria, con los cuales se definieron los subdominios dentro de la cuenca, además de ayudar a identificar los factores determinantes de la formación y dirección de esta (meteorología y topografía).

Figura 47. Conformación final de la cuenca

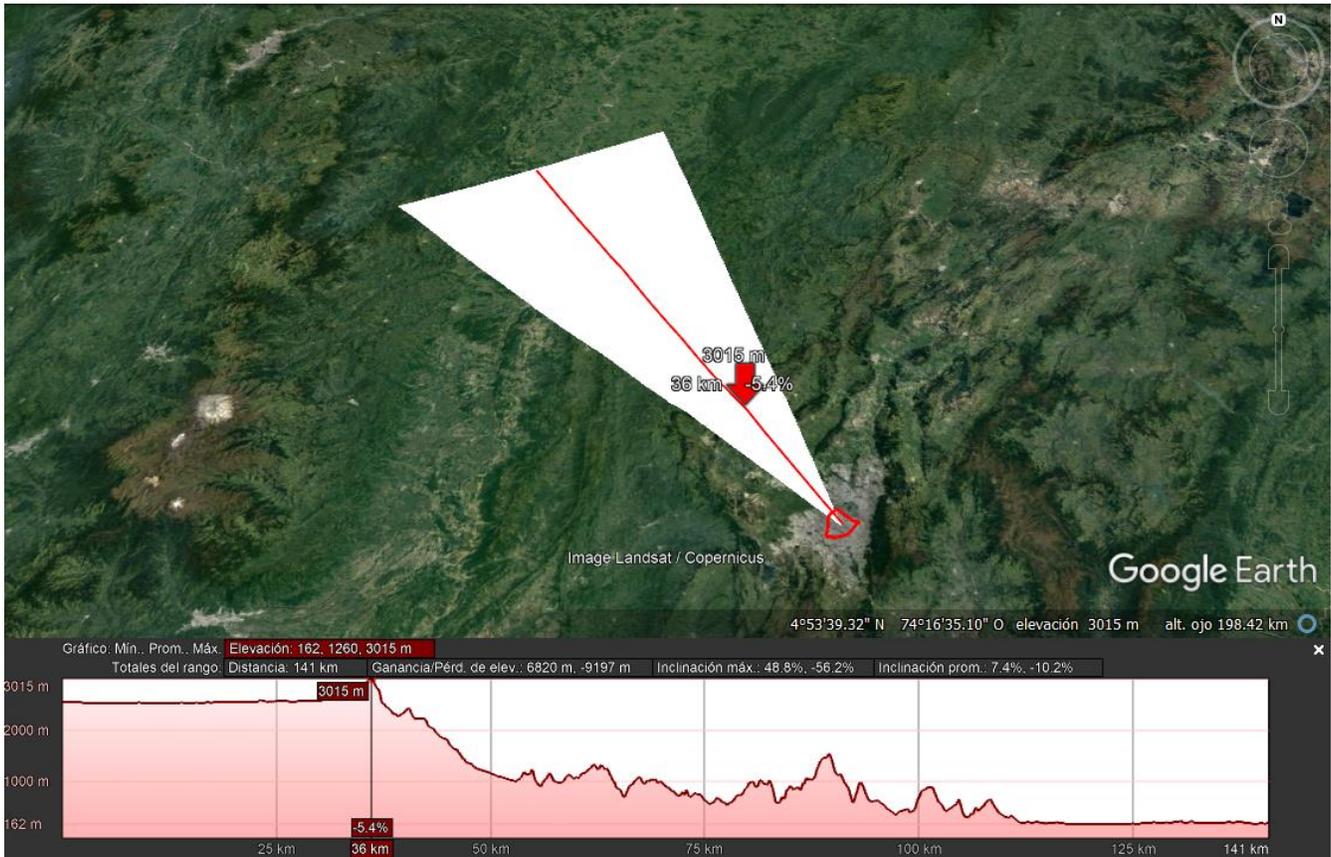


Fuente: Creación Propia con adaptación de Google Earth

10.15 Topografía

El área de estudio está conformada por el sistema montañoso de Los Andes, dividido en 3 grandes cordilleras que alcanzan alturas de hasta los 5380 msnm. La región Andina se particulariza por presentar los altiplanos localizados en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Nariño, la zona montañosa del centro de Antioquia, Cauca y el viejo Caldas (IDEAM, 2014). El altiplano Cundiboyacense es fluvio-lacustre, con un relieve plano a ligeramente inclinado con sus diferentes niveles de terrazas lacustres y colinas suaves (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2015). La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada en la parte centro-oriental del país, al lado occidental de la cordillera Oriental (Banco de la República, s.f.).

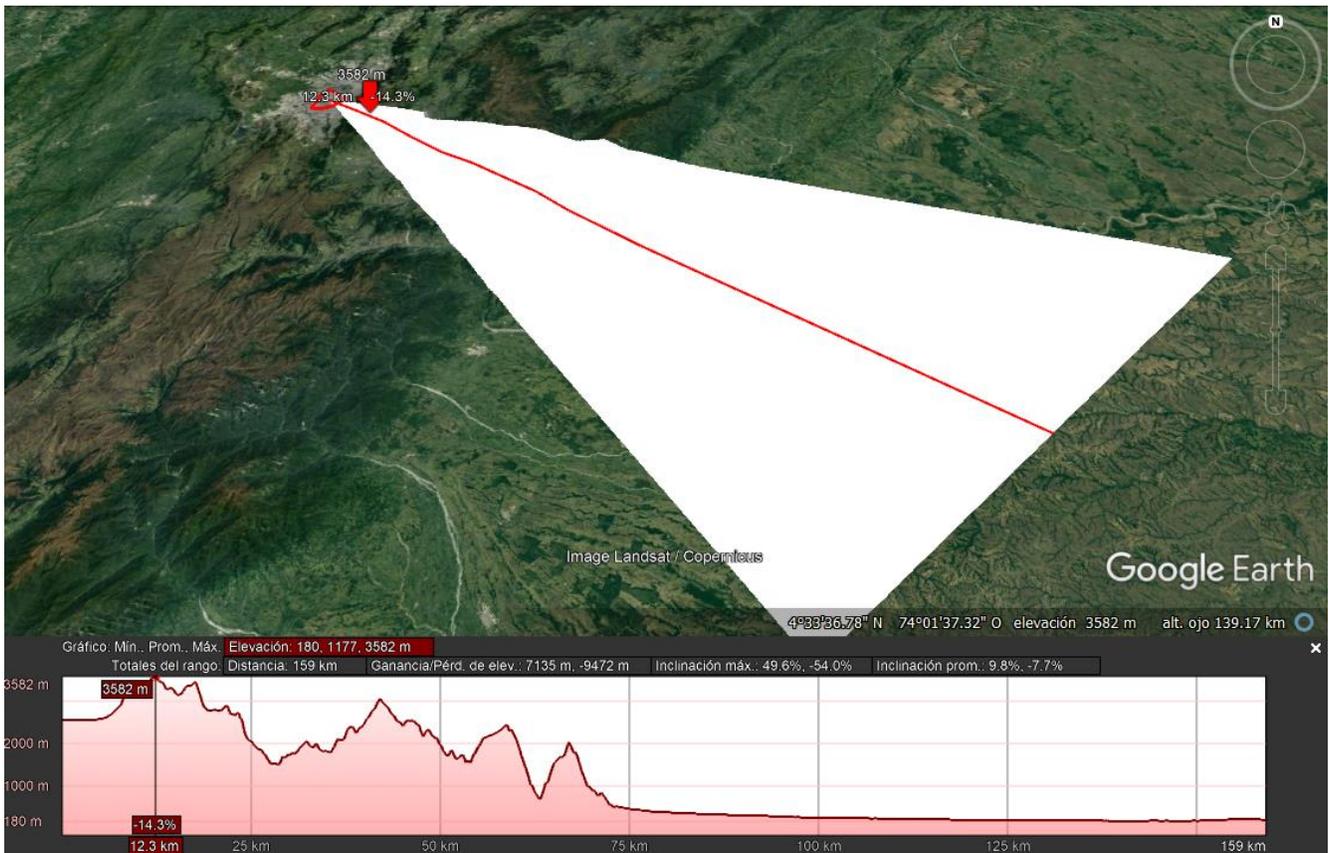
Figura 48. Mapa de relieve de la región de estudio hacia el noroeste



Fuente: Creación Propia con adaptación de Google Earth

En las figuras 48. y 49., se evidencia que la ciudad de Bogotá se encuentra en el flanco occidental de la cordillera Oriental, el viento que atraviesa la ciudad se ve cortado en alturas de hasta 1000 metros por formaciones montañosas que se encuentran entre Cota y Tenjo; y en el Suroriente por altitudes de hasta 800 metros por los cerros Orientales. Teniendo en cuenta las direcciones del viento durante las diferentes épocas estudiadas, hacia el Norte se encuentra como obstáculo del paso del viento, una formación montañosa en la cordillera Central, entre los municipios de Casablanca y La Magola. A 46 Km en dirección Sureste, se encuentra el Parque Nacional Natural Chingaza donde se encuentran formaciones montañosas con elevación de 3800 msnm que se encuentra a 1200 m de altura sobre el suelo del punto de partida del estudio.

Figura 49. Mapa de relieve de la región de estudio hacia el sureste



Fuente: Creación Propia con adaptación de Google Earth

La cuenca conformada de acuerdo con los criterios previos se encuentra formada a través del todo el territorio nacional. Teniendo en cuenta ambos polígonos formados, cada uno tiene un área de dispersión de 19'729.000 Ha al Noroeste y 21'326.300 Ha al Sureste. Como se observa en la figura x., la cuenca está definida por la topografía con los puntos resaltados en verde (Figura x. cuenca), los cuales poseen alturas con capacidad de intervenir en la movilidad del viento. Según Parques Nacionales Naturales de Colombia (2009):

- En el Noreste, la cuenca se ve delimitada por el Parque Nacional Natural Paramillo, con una extensión de 504.014 Ha y altitudes de hasta 3960 msnm en su parte sur
- En el Norte, la unidad morfológica de la Serranía del Darién se proyecta sobre el eje costero del mar caribe entre el Río Diablo en Panamá y el bajo Atrato en Colombia, con elevaciones menores a los 2000 msnm (Banco de Occidente, 2009).
- El Parque Nacional Natural Sumapaz, que se encuentra al Este de la cuenca, abarca aproximadamente el 43% de los páramos del mundo, con una extensión total de 333.420 Ha con elevaciones desde los 1500 y 4300 msnm.

- Ubicado en la Cordillera Oriental de los Andes, al Noroeste y a 13 Km de Bogotá, se encuentra el Parque Nacional Natural Chingaza, que cuenta con una extensión de 76.600 Ha y tiene alturas de 800 a 4000 msnm.
- En el área donde la cuenca se divide en 2 partes, se encuentra el Parque Nacional Natural Los nevados, localizado en el Eje Cafetero, en el complejo volcánico conformado por el Nevado del Ruiz, el Nevado de Santa Isabel, el Nevado del Tolima y los paramillos del Cisne, Rosa y Quindío. Esta reserva conformada para la conservación del ecosistema de nieves perpetuas cuenta con formaciones montañosas de alturas que alcanzan los 4800 msnm.
- En el Sureste se eleva la Sierra de la Macarena, con una extensión de 130 Km entre su gran variedad de ecosistemas. Esta serranía localizada en el departamento del Meta es un refugio de vida silvestres independiente del recorrido de las 3 cordilleras que atraviesan el país. Esta formación tiene alturas que varían entre los 270 y 1700 msnm.

Figura 50. Mapa de la topografía de interés



Fuente: Creación Propia con adaptación de Google Earth

10.16 Criterios de planificación

Actualmente en Colombia, la principal causa de contaminación del aire y de la atmósfera es causada por el uso de combustibles fósiles. El 41% de las emisiones son generadas en las principales ciudades del país, lideradas por Bogotá, seguida de Medellín y Cali (Ramírez, et al., 2013). De igual forma, en Cartagena, Barranquilla, Bucaramanga y Sogamoso se generan emisiones de contaminantes atmosféricos, tal como en zonas de explotación minera ubicadas en el Cesar y la Guajira (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Dado que en el país hay gran cantidad de industrias que utiliza o explota combustibles fósiles, es necesario determinar políticas de ordenamiento útiles a partir de la implementación de la metodología utilizada en este proyecto y conformación de las cuencas atmosféricas correspondientes a cada ciudad para así modificar los Planes de Ordenamiento Territorial, en los cuales se responsabilicen las principales ciudades del país por los contaminantes que se dispersan desde los puntos de origen frente a los problemas de salud que podrían estar ocasionando en regiones del país que presenten vulnerabilidad ante el alcance de movimiento de las masas de aire.

La Planificación Territorial se basa en la resolución de conflictos y el uso prudente de los recursos para atender las necesidades del desarrollo sostenible. En el caso de Colombia, se tienen reglamentadas y contempladas las normas de calidad del aire en cada uno de los planes de ordenamiento, sin embargo, se han imitado a la dinámica del aire a bajas alturas en las ciudades donde se encuentran ubicadas estaciones de monitoreo de calidad del aire, no obstante, la realización de estos estudios presenta una oportunidad de mejora para el ambiente de las personas que viven en todo el país y en la realización de investigaciones que profundicen conocimientos en las dinámicas en la troposfera alta y en la atmósfera de Colombia. La metodología utilizada representa posibilidad de relacionar y prevenir la salud de todos los ciudadanos que residen en Colombia.

No solo Bogotá es una ciudad que presenta conflictos ambientales relacionados a la calidad del aire, tal como fue revisado en el estudio realizado por Daniela Camelo y Natalia Valbuena en el año 2017, donde se realizó una revisión de cuencas atmosféricas, ha quedado demostrado que es necesario que el país cuente con la implementación de modelos de cuencas atmosféricas como herramienta para la planificación y prevención de la salud. En este estudio realizado para la ciudad de Bogotá, especialmente en la Zona Industrial que queda ubicada en la localidad de Puente Aranda, también se probó que la contaminación generada en este espacio no afecta únicamente a la comunidad ubicada allí, sino que se puede dispersar hasta atravesar fronteras del país.

10.16.1 Contaminación transfronteriza

Dentro de los compromisos trazados en el Convenio de Ginebra llevado a cabo en el año 1979 y entrado en vigor para 1983, se planteó el tema de la contaminación transfronteriza a gran distancia, definida como la liberación de sustancias o energía realizada hacia la atmósfera por el ser humano, que tengan efectos perjudiciales para la salud, el medio ambiente o bienes materiales en otros países, sin que sea posible distinguir las fuentes individuales o colectivas de la liberación.

En principio, el tratado buscaba definir un marco de cooperación intergubernamental dado que esta problemática fue asumida de tipo regional y zonal, de modo que se reconoció la posible afectación de la contaminación atmosférica generada en un punto determinado que podría afectar otros países cercanos. La cooperación se estableció para los países europeos, sin embargo, en el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente de Colombia (Decreto Ley 2811 de 1974) varios apartados establecen el compromiso que se tiene con dicho tema, de modo que se plantea a la calidad del aire como elemento indispensable para la salud humana, animal o vegetal.

De acuerdo con la Convención de Ginebra donde se firmaron acuerdos entre otras cosas, acerca de contaminación atmosférica se habló principalmente de NOx, SOx y PM por su propensión a ser dispersados a través de la atmósfera. Es necesario realizar más investigación a nivel de concentración, temperatura y factor de humedad relativa que permita correlacionar los contaminantes. También en cuanto a modelos de transporte de contaminación a alturas más elevadas.

Es importante establecer que Colombia debe sumarse para cumplir las metas generales que los acuerdos internacionales han planteado, de modo que se establezca que el país también es responsable de las emisiones que se generen dentro del territorio nacional. Lo anterior por medio de desarrollo de políticas claras, actividades de investigación, seguimiento y vigilancia del transporte de contaminantes por trayectorias de masas de aire a gran escala, compromisos de reducción y control de los contaminantes sobre todo en el sector de la industria, todo en aras de prevenir la problemática de trasladar a un plano internacional los problemas en cuanto a calidad del aire y atmósfera.

De acuerdo con la cuenca atmosférica esbozada en el desarrollo del proyecto, desde el punto de origen utilizado y entre la mayoría de las trayectorias observadas, se definió que los contaminantes se pueden dispersar hasta el departamento del Chocó, Valle del Cauca y el Pacífico. Sin embargo, teniendo en cuenta otras trayectorias de gran y poca frecuencia, en los departamentos de Antioquia, Nariño, Cauca, Meta, Tolima, Huila, Córdoba, Putumayo, Caquetá, Amazonas y Quindío se pueden dispersar en menor medida los contaminantes. Cabe destacar que es de gran preocupación el alcance de los contaminantes, dado que estos atraviesan las fronteras del país afectando territorios amazónicos del Ecuador y Perú y la capital de Panamá.

10.16.2 Incidencia de fenómenos meteorológicos en el Ordenamiento Territorial

En episodios del fenómeno La Niña, se observó que generalmente las temperaturas son más bajas, la precipitación tanto de la capital como de todo el país aumenta, la humedad relativa y la velocidad del viento son mayores. Dadas estas deducciones, se sabe que los contaminantes no solo se dispersan con mayor facilidad que en otras condiciones meteorológicas, sino que también en temporadas en que se originan más emisiones de contaminantes, también se elevan con tal rapidez que la precipitación horizontal y vertical se vuelven tóxicas e irritantes para los ciudadanos de Bogotá; es por esto que es recomendable para la planificación de Bogotá y de todos los casos de próximos estudios que, en temporadas de lluvias comunes y ocasionadas por el fenómeno La Niña, se utilicen en menor medida los combustibles fósiles de la industria y se intensifique la restricción vehicular por medio del “pico y placa” a todos los vehículos con diferente referencia de servicio.

Durante el tiempo en que se presenta el Fenómeno El Niño fue posible apreciar cómo en general la temperatura es alta mientras que la humedad relativa, la velocidad del viento y la precipitación son bajas. Lo anterior impide que los contaminantes se dispersen con facilidad, provocando que éstos generen episodios de afectación más seguidos en el área de origen.

Al comprender el comportamiento de la meteorología de la capital del país y para efectos de este trabajo, se proponen alternativas o lineamientos de planificación con respecto al comportamiento observado en los meses de estudio donde se dio este fenómeno a lo largo de todo el año. Al trazar la cuenca y reconocer los departamentos que terminarían recibiendo la mayor cantidad de sustancias contaminantes, es importante definir cuáles son las industrias principales que más los generan, de modo que se busque que se reduzca su generación y se cierren o reubiquen fábricas donde la movilidad de los contaminantes no afecten a la ciudad donde se originan u otras regiones aledañas; y se regule también el transporte de vehículos de carga pesada por las vías principales que se encuentran en la localidad. Con base en la información topográfica completa del país, es posible realizar zonificación de territorios.

10.16.3 Cuencas atmosféricas como unidad de gestión y herramienta de planeación

El uso de las cuencas atmosféricas para el ordenamiento y la planificación regional es útil para la identificación de las más grandes fuentes de emisión y los impactos localizados en un área geográfica de gran extensión, permite relacionar condiciones meteorológicas, topográficas y ambientales para reconocer problemáticas de calidad del aire y de la atmósfera y es útil para prevenir periodos de contaminación crítica. Por otro lado, además de contemplar la dispersión de todos los contaminantes originados en un punto, en el caso estudiado en este documento, tiene en cuenta la dinámica atmosférica sin importancia de las fronteras políticas.

El abordar el tema de las cuencas atmosféricas como una metodología que permite establecer el área de estudio como una unidad de gestión, da pie para que sean involucradas distintas unidades administrativas de los territorios que pueden ser o no influenciadas o afectadas por emisiones atmosféricas de origen urbano, agrícola o por fuentes naturales que tienen potencial para transformar la calidad del aire de una región determinada. (Iniestra y Caetano, 2008). Para efectos de esta investigación se buscó establecer la cuenca atmosférica considerando la influencia que tienen las emisiones provenientes de actividades industriales de la localidad de Puente Aranda en la ciudad de Bogotá, a partir del análisis de las trayectorias de masas de aire definiendo los focos de influencia los cuales van más allá de la región descrita.

Para la generación de una política de ordenamiento nacional que tenga en cuenta los modelos de cuencas atmosféricas, es necesario que las autoridades pertinentes reporten la información necesaria para la conformación de los modelos. Es necesario de igual manera que se conforme una nueva autoridad que esté preparada para la aplicación de la metodología y tenga la capacidad de diseñar estrategias de prevención de riesgos ambientales de forma tal que se establezcan modelos para la toma de decisiones de ordenamiento para implementar en las políticas tanto regionales como nacionales, integrando el tema de la calidad atmosférica a las agendas de planificación y ordenamiento del territorio.

Colombia paralelamente está necesitando el equipo o las fuentes necesarias para recopilación y análisis detallado de la información necesaria para hacer caracterización completa de las dinámicas de contaminantes que aparecen en cada cuenca. De igual forma es necesario actualizar la normatividad que regula las emisiones en el país para que la industria se limite a utilizar únicamente los combustibles fósiles necesarios, que trasladen su actividad a zonas de menor riesgo de dispersión de los contaminantes o que renueven equipos de tal manera que no consuman combustibles.

De acuerdo a las cuencas atmosféricas es posible determinar las horas del día entre las cuales la concentración de contaminantes puede mayor en una zona y a través de la velocidad de los vientos, identificar la eventual movilización de estos a otras zonas, es por esto que a través de las cuencas se pueden encontrar lugares donde la industria puede realizar su actividad libremente sin que se concentren contaminantes a bajas alturas y tampoco se dispersen a centros poblados, esto, dependiendo de las variables atmosféricas y la topografía del área. Todo esto depende de monitoreo atmosférico constante y preciso, de modo que los procesos industriales también se realicen en los horarios en los que las temporadas climatológicas no permitan que la concentración se disperse.

11. Conclusiones

La localidad de Puente Aranda manifiesta un caso particular en el que se sobrepasa el valor que indica la normatividad, pasando por encima del límite para contaminantes del aire que pueden ser considerados perjudiciales para la salud de los ecosistemas y las personas que están en contacto directo. Dado lo anteriormente explicado, es posible concluir que el criterio que será utilizado para trabajar el modelo HYSPLIT será el PM10 dado que se trata del dato más completo en cuanto a número de mediciones se refiere y que de igual manera, muestra la mayor excedencia de la norma tanto nacional como internacional en los últimos 10 años.

La revisión de la meteorología local y regional permitió reconocer el comportamiento de las masas del aire a partir de condiciones climáticas y la variabilidad de la dispersión de contaminantes según la presencia de fenómenos tropicales que se presentan en Colombia. Se demostró igualmente que el comportamiento del clima de Colombia presenta regímenes estacionales bimodales evidentes durante los fenómenos El Niño y La Niña.

Se observó que igualmente en presencia o ausencia de los fenómenos, los alisios provenientes del Sureste tienen dominancia en el comportamiento de la circulación de los contaminantes atmosféricos la mayor parte del tiempo. El modelo realizado en HYSPLIT se escogió de tal manera que se conocieran trayectorias durante épocas de diferentes y extremas condiciones climáticas para revisar la capacidad de dispersión de contaminantes para explicar hasta qué departamentos, o en este caso, regiones de Colombia donde puede ser posible que se registren concentraciones provenientes de Bogotá (Puente Aranda).

Si bien el modelo se realizó a partir de datos obtenidos por monitoreo satelital de la división de la NASA enfocada en la administración oceánica y atmosférica (NOAA), los limitantes trazados por las Creación Propia del documento pueden estar sujetas a errores de interpretación de trayectorias debido

a que la topografía observada puede no ser la única que limita o desvía el movimiento de las masas de aire.

A partir de este estudio se pudieron generar aproximaciones de la verdadera cuenca atmosférica teniendo en cuenta factores meteorológicos y topográficos demostrando así que con posibles escenarios de contaminación atmosférica crítica se puede reconocer las regiones por donde pasan las masas de aire que transportan sustancias contaminantes.

En términos de contaminación atmosférica, la localidad de Puente Aranda manifiesta un caso particular en el que se sobrepasa el valor que indica la normatividad, pasando por encima del límite para contaminantes del aire que pueden ser considerados perjudiciales para la salud de los ecosistemas y las personas que están en contacto directo. Dado lo anteriormente explicado, es posible concluir que el criterio que será utilizado para trabajar el modelo HYSPLIT será el PM10 dado que se trata del dato más completo en cuanto a número de mediciones se refiere y que de igual manera, muestra la mayor excedencia de la norma tanto nacional como internacional en los últimos 10 años.

Los resultados de este trabajo manifiestan cómo la contaminación por material particulado en la localidad se ha visto incrementada durante la última década. Esta tendencia se explica por el crecimiento económico de la ciudad en ausencia de medidas efectivas para el control de las emisiones causadas por las fuentes fijas y móviles.

Tomando como punto de partida la tesis “Acercamiento preliminar a las cuencas atmosféricas por medio del análisis de trayectorias de masas de aire como herramienta para la planificación territorial en el Valle de Sogamoso, Boyacá”, el presente trabajo buscó servir como punto de comparación al buscar delimitar la cuenca atmosférica de la ciudad de Bogotá, de modo que sea posible conocer la dirección de las trayectorias aire que transportan contaminantes a determinados niveles de presión.

La interpretación de las cuencas atmosféricas como herramienta de planificación territorial enmarca para Colombia un nuevo reto a abordar y una nueva perspectiva que puede llegar a ser muy útil para el establecimiento de los Planes de Ordenamiento Territorial y la toma de decisiones, partiendo desde la perspectiva de la contaminación atmosférica transfronteriza, para las regiones donde se busque siempre garantizar la salud de las personas y de los ecosistemas que conforman un lugar y pueden llegar a verse afectados en mayor o menor medida. Los compromisos deben ser claros ya que gracias a la delimitación de las cuencas es más sencillo determinar las áreas concretas afectadas, teniendo en cuenta la topografía y meteorologías propias siguiendo patrones que fueron evidenciados a través del tiempo.

12. Recomendaciones

Los resultados de esta investigación podrían ser más precisos si se hubiesen obtenido series de datos más completos meteorológicos y de contaminantes de la estación monitoreo utilizada ya que la estación meteorológica seleccionada carecía de alguna información importante para poder realizar un análisis más a fondo.

Se recomienda realizar el análisis de las trayectorias para los demás complejo urbano - industriales del país con el fin de tener una visión más amplia del uso de esta herramienta de ordenamiento y explorar toda su capacidad estableciendo otros periodos de fenómenos meteorológicos, de incendios forestales o periodos netamente estables donde sea posible observar los cambios de la delimitación de las cuencas atmosféricas. El abordaje del tema de cuencas atmosféricas también se puede realizar en menor escala, en sentido local, de modo que se evalúe la metodología en un espectro micro regional.

También se sugiere establecer modelos de seguimiento para los contaminantes atmosféricos, estableciendo realmente y por medio de otros modelos de calidad del aire el alcance y la dispersión de los contaminantes, de modo que también se evalúe los distintos contaminantes secundarios que podrían generar, su comportamiento a escalas más arriba de la capa límite atmosférica y sus propiedades de reacción y potencial nocivo ya que en el presente estudio sólo se abordaron de forma general.

Los estudios y uso de modelos diferentes también se sugieren para la realización de trabajos similares al presente ya que se puede complementar al uso de HYSPLIT (resultados en materia de trayectorias de masas de aire) con otras posibilidades dentro del mismo programa como la simulación de transporte de sustancias o con alguno diferente que permita evaluar la dispersión de los contaminantes. El PM10 constituye una partícula idónea para ser tenido en cuenta a la hora de trazar la cuenca ya que a nivel de modelos tiene un mejor balance de materia o algún otro contaminante que permita ser rastreado mediante sensores remotos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el desarrollo del primer objetivo, se observó que en la normatividad nacional los límites permisibles de emisiones de diferentes atmosféricos tienen mayor consentimiento de contaminación que en la normatividad internacional; dado que esta normatividad internacional fue originada de acuerdo a investigaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud, se debería tener en mayor consideración por la normatividad Colombiana, pues los límites permisibles en Colombia pueden ser causantes de otras problemáticas a nivel de salud humana, daños a la propiedad privada, aumento de efectos de cambios climáticos y afectación a otras especies.

13. Referencias Bibliográficas.

1. Affholder, M y Valiron, F. (2001) Descriptive Physical Oceanography. CRC Press, 1/01/2001 - - Technology & Engineering. (370 p)
2. Alam, K. Qureshi, S. Blaschke y T. (2011) Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. Atmospheric Environment, Volume 45, Issue 27, September 2011, Pages 4641-4651. Pakistán.
3. Alcaldía Local de Puente Aranda (2012). Plan Ambiental Local Puente Aranda. Tomado el 16 de Agosto de 2019: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883174/PAL+Puente+Aranda+2013-2016.pdf>
4. Alcaldía Mayor de Bogotá (2008). Documentos de seguridad. Planes y diagnósticos de seguridad Localidad 16 – Puente Aranda. 82 páginas. Tomado de http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Localidades/Puente_Aranda/Diagnostico_Seguridad_PuenteAranda-Alcaldia_Mayor.pdf
5. Alcaldía Mayor de Bogotá (2010). Localidad Puente Aranda. Diagnóstico Local con Participación social (2009-2010). Tomado en 25 de Febrero de 2019: <http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Diagnosticos%20Locales/16-PUENTE%20ARANDA.pdf>
6. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, Secretaría de Gobierno (2008) Planes y diagnósticos de seguridad Localidad 16 – Puente Aranda. 82 páginas. Tomado de http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Localidades/Puente_Aranda/Diagnostico_Seguridad_PuenteAranda-Alcaldia_Mayor.pdf
7. Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría de ambiente, (2009) Agenda Ambiental Localidad 16 Puente Aranda. Tomado en 25 de Febrero de 2019: <file:///C:/Users/ALCIRA%20AVENDA%C3%91O/Downloads/PuenteArandaAgendaAmbientaLocal.pdf>
8. Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría distrital de Planeación (2010). Diagnóstico Local con Participación Social 2009-2010., p. 29. Tomado de <http://www.saludcapital.gov.co/sitios/VigilanciaSaludPublica/Diagnosticos%20Locales/16-PUENTE%20ARANDA.pdf>
9. Alcaldía Mayor de Bogotá y Secretaría distrital de Planeación (2018). Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C., p. 24.
10. Alfonso, J. (2014) Puente Aranda: Una nueva cara a la ciudad. Universidad Católica de Colombia. Facultad de diseño. Programa de arquitectura. Bogotá D.C. Tomado en 25 de Febrero de 2019: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2140/1/Puente-Aranda-una-nueva-cara-a-la-ciudad.pdf>
11. Anderson, J., Thundiyil, J.G. y Stolbach. A. (2012). Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. J Med Toxicol. 2012 Jun; 8(2):166-75.
12. Arya, S. P. S., 1988: Introduction to micrometeorology. International Geophysics Series. Academic Press. New York. 303 pp.
13. Arango, C., Dorado, J., Guzmán D. y Ruíz, J. F. (s.f.) Variabilidad Climática de la Precipitación en Colombia Asociada al Ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM Tomado el 25 de septiembre de 2019: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatica+Trimestral+Precipitacion+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/eec9752d-05ac-43f5-913c-4a3c7adc7860>

14. Avellaneda, A. (2013). Gestión ambiental y planificación del desarrollo: El sujeto ambiental como actor político. Ecoe Ediciones, 2013 - 390 páginas.
15. Ballester, Ferran. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. Revista Española de Salud Pública, 79(2), 159-175. Tomado en 17 de mayo de 2019, de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200005&lng=es&tlng=es.
16. Banco de la República (s.f.). Geografía, Topografía y Clima. Tomado el 26 de Septiembre de 2019: <http://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/478/1.%20Geograf%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
17. Banco de la República (s.f.). Geografía, Topografía y Clima. Tomado el 26 de septiembre de 2019: <http://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/478/1.%20Geograf%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
18. Banco de Occidente (2009). Sierras y Serranías de Colombia. Serranía del Darién-San Blás. Tomado el 29 de Septiembre de 2019: <https://www.imeditores.com/banocc/sierras/cap11.htm>
19. Banco de Occidente (2009). Sierras y Serranías de Colombia. Serranía del Darién-San Blás. Tomado el 29 de Septiembre de 2019: <https://www.imeditores.com/banocc/sierras/cap11.htm>
20. Bidegain, M. (2010). Introducción a la meteorología. Montevideo: Universidad de la República Oriental del Uruguay.
21. Calvo, D., Molina, M. T. y Salvachúa, J. (2009). Ciencias de la Tierra y Medioambientales. BLOQUE IV. Capas fluidas. Unidad 10. Contaminación atmosférica. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.; Edición: 1. ISBN: 84-481-6981-6
22. Cámara de Comercio de Bogotá, (2007). Perfil económico y empresarial. Localidad Puente Aranda.
23. Camelo, D. y Valbuena, L. (2017). Acercamiento preliminar a las cuencas atmosféricas por medio del análisis de trayectorias de masas de aire como herramienta para la planificación territorial en el Valle de Sogamoso, Boyacá. (2017) Tesis de Grado. Bogotá: Universidad El Bosque. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental.
24. Castillo, A. (2003) Dinámica de la construcción por usos localidad Puente Aranda. Alcaldía Mayor de Bogotá. Tomado en 25 de Febrero de 2019: https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/12_0.pdf
25. Castro, M., González, A. y Portela, A. (1991). Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico meteorológico. Dpto. Geofísica y Meteorología. Facultad de Física. Universidad Complutense. Madrid. España
26. CCCP, Centro Control Contaminación del Pacífico. (2002). Compilación oceanográfica de la Cuenca Pacífica colombiana. Imágenes de la Naturaleza: CCCP.
27. Centro de Ciencias de la atmósfera Universidad Nacional Autónoma de México, (2016) Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
28. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH (2010) Informe General de la Climatología del Caribe Colombiano. Climate Prediction Center, 2019. Cold & Warm Episodes by Season. Tomado el 10 de Septiembre: <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/01-InfoGeneralClimatCaribeCol.pdf>
29. Cepeda, W. E. (2000). Atmósfera Terrestre. Sociedad Geográfica de Colombia. Tomado en 16 de Marzo de 2019: https://www.sogeocol.edu.co/documentos/atm_terr.pdf

30. Chang, P., T. Yamagata, P. Schopf, S.K. Behera, J. Carton, W. S. Kessler, G. Meyers, T. Qu, F. Schott, S. Shetye y S.-P. Xie. (2006). Climate fluctuations of tropical coupled systems: The role of ocean dynamics, *Journal of Climate*, 19: 5122 –5174. doi:10.1175/JCLI3903.1.
31. CIIFEN - Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno El Niño (2017). El Niño 2015-16: evolución, vulnerabilidad e impactos en Latinoamérica. Tomado el 3 de Octubre de 2019: https://www.researchgate.net/publication/321724092_El_Niño_2015-16_evolucion_vulnerabilidad_e_impactos_en_Latinoamerica
32. CIIFEN - Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno El Niño (2017). El Niño 2015-16: evolución, vulnerabilidad e impactos en Latinoamérica. Tomado el 3 de Octubre de 2019: https://www.researchgate.net/publication/321724092_El_Niño_2015-16_evolucion_vulnerabilidad_e_impactos_en_Latinoamerica
33. Clean Air Initiative for Asian Cities Center. (2010). “Factsheet No. 5 – Sulfur dioxide (SO₂) Status and Trends in Asia”. Pasig City, Philippines.
34. Congreso Colombiano de Calidad del Aire y Salud Pública (2007). Modelación de Calidad del Aire en Cerrejón. Tomado el 25 de febrero de 2019: <https://docplayer.es/58860013-Modelacion-n-de-calidad-del-aire-en-cerrejon.html>
35. CRANA. Fundación Centro de Recursos Ambientales de Navarra (s.f.). Dióxido de azufre SO₂. Tomado de http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/diaxido-azufre-so2
36. Davydova Belitskaya, V (s.f.). Proyecto de Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Jalisco, México. Cuencas Atmosféricas del estado de Jalisco. Instituto de Astronomía y Meteorología, Departamento de Física, C.U.C.E.I. Tomado de <http://siga.jalisco.gob.mx/moet/SubsistemaNatural/Clima/catmos.htm>
37. Draxler, R. R., y Rolph, G. D. (2003). HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), 4. (S. S. NOAA Air Resources Laboratory, Editor) Tomado el 25 de Febrero de 2019: <http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
38. El Espectador. (9 de octubre de 2012). Se declara en emergencia ambiental el sector de Puente Aranda. *El Espectador*. Tomado de elespectador.com/noticias/soyperiodista/se-declara-emergencia-ambiental-el-sector-de-puente-ara-articulo-380234
39. El Tiempo (2 de junio de 2016). El Niño devastó por incendios área equivalente a tres veces Cali. Tomado el 10 de Septiembre: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16610226>
40. El Tiempo (2008). 68% de las industrias ubicadas en Puente Aranda son altamente contaminantes del ambiente. Tomado el 13 de octubre de 2019: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4501984>
41. El Tiempo. (4 de septiembre de 2008). 68% de las industrias ubicadas en Puente Aranda son altamente contaminantes del ambiente. Redacción El Tiempo. Tomado de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4501984>
42. Enfield, D. (1997). Relationships of Inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. *Geophysical Research Letters*: 1-4. American Geophysical Union. Estados Unidos.
43. ERFEN - Comité Técnico Nacional Estudio Fenómeno El Niño (2016). Seguimiento del Fenómeno El Niño 2014-2016. Tomado el 3 de Octubre de 2019: https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/comunicado_nacional_n_01_erfen_enero_2016_0.pdf
44. ERFEN - Comité Técnico Nacional Estudio Fenómeno El Niño (2016). Seguimiento del Fenómeno El Niño 2014-2016. Tomado el 3 de Octubre de 2019: https://www.dimar.mil.co/sites/default/files/noticias/comunicado_nacional_n_01_erfen_enero_2016_0.pdf

45. Euscátegui, C. y Hurtado, G. (2011) Análisis del Impacto del Fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la Hidroclimatología del País. Tomado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%A1lisis+Impacto+La+Ni%C3%B1a.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
46. FAO (2019). Plataforma de Territorios Inteligentes. Ordenamiento Territorial. Tomado en 16 de Marzo de 2019: <http://www.fao.org/in-action/territorios-inteligentes/componentes/ordenamiento-territorial/introduccion/es/>
47. Gaitán, M. (2007) Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. Revista Scielo. Tomado en 16 de Marzo de 2019: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>
48. Gaitán, M. (2007). Evaluación de la Calidad del Aire de Bogotá con base en la Información de la Red de Monitoreo de la Ciudad de Bogotá: Universidad de Los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
49. Gaitán, M. y Behrentz, E. (2009). Evaluación del Estado de la Calidad del Aire en Bogotá. Grupo de Estudios de Sostenibilidad Urbana (SUR). Universidad de Los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
50. Galán, D. y Fernández, R. (2006). IMPLICACIÓN DE LOS NOX EN LA QUÍMICA ATMOSFÉRICA. Tomado el 13 de Octubre de 2019 de: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-41377/2006%202%20david%20galan%20y%20otro.pdf>
51. García J., Ruiz L., García, S. y Reséndiz, S. (2009) Comportamiento de los contaminantes en cuencas atmosféricas: metodología y estudio de caso. Dirección general de investigación sobre la contaminación urbana y regional (DGICUR). México.
52. García, J. C., García, C. A. y Vaca, M. L. (2012) Evolución del Marco Normativo de la Salud Ambiental en Colombia. Tomado en 16 de Marzo de 2019: <http://www.scielo.org.co/pdf/rsap/v15n1/v15n1a06.pdf>
53. Garrat, J. R. (1992). The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge Atmospheric and Space Science Series.
54. Gauderman W. J. (2006). Air Pollution and Children — An Unhealthy Mix, N Engl J Med ed 355;1 Tomado el 25 de Febrero de 2019: www.NEJM.org.
55. González, S., León, C., Miranda, G., Marrero, C. L. y Stein, A. (2009) Paralelización de la obtención de datos de entrada del modelo de concentraciones de HYSPLIT. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, España.
56. Guzmán, Ruíz, & Cadena. (2014). Regionalización de Colombia Según la Estacionalidad de la Precipitación Media Mensual, a Traves Análisis de Componentes Principales (ACP). IDEAM. Tomado el 25 de febrero de <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/documents/21021/21789/Regionalizaci%C3%B3n+de+l+lluvia+en+Colombia.pdf/92287f96-840f-4408-8e76-98b668b83664>
57. Harrison, R.M. y Jianin, Y. (2000) Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health, The Science of the Total Environment 2000;249; pág 85-101
58. Hernández, A., Jáuregui, U., Souto, J.A., Casares, J.J., Saavedra, S., Guzmán, F. y Torres, A. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. Centro de Estudios Avanzados de Cuba. Revista de Posgrado. Vol 3(2).

59. Hernández, L. (2010) Contaminación del aire y enfermedad respiratoria en menores de cinco años de Bogotá, 2007. Rev. salud pública, Volumen 15, Número 4, p. 503-516, 2013. ISSN electrónico 2539-3596. ISSN impreso 0124-0064.
60. Hernández, M. (2012). Caracterización meteorológica y modelización de Andalucía occidental. Huelva: Universidad de Huelva.
61. Hospital del Sur, (2005) Plan Ambiental Local Puente Aranda. Alcaldía de Puente Aranda. Tomado el 25 de Febrero de 2019: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883174/PAL+Puente+Aranda+2013-2016.pdf>
62. Hospital del Sur, (2014) Atlas de salud pública localidad Puente Aranda. Hospital del Sur Ese I nivel de atención vigilancia en salud pública. Tomado el 25 de febrero de 2019: <http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Documentos%20Vigilancia%20en%20Salud%20Pblica%20Geografica1/An%C3%A1lisis%20espacial%20por%20localidad/Atlas%20de%20Salud%20P%C3%BAblica/2014/Atlas%20de%20Salud%20P%C3%BAblica.%20Localidad%20Puente%20Aranda%202014.pdf>
63. IDEAM (2011). Base de datos estaciones hidrometeorológicas del país.
64. IDEAM (2012). Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. Tomado el 25 de Febrero de 2019: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/5.+Informe+del+estado+de+la+calidad+del+aire+2007-2010.pdf/52d841b0-afd0-4b8e-83e5-444c3d17ed29?version=1.0>
65. IDEAM (2014). Calidad del Aire. Subsistema de Información Sobre Calidad del Aire-SISAIRE. Tomado el 25 de Febrero del 2019: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
66. IDEAM (2014). Unidades Geomorfológicas del Territorio Colombiano. Tomado el 26 de Septiembre de 2019: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/unidadesgeomorf/unidgeom.pdf>
67. IDEAM (2016). Anuario Climatológico 2015. Tomado el 3 de Octubre de 2019: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual>
68. IDEAM (2016). Boletín Informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática Minero-Energética La Niña”. Tomado el 10 de Septiembre: http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la-nina?p_p_id=110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN_struts_action=%2Fdocument_library_display%2Fview_file_entry&_110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Ftiempo-y-clima%2Fboletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la-nina%2F-%2Fdocument_library_display%2FI6NwA8DioHgN%2Fview%2F93551515%3F_110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN_redirect%3Dhttp%253A%252F%252Fwww.ideam.gov.co%252Fweb%252Ftiempo-y-clima%252Fboletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la-nina%253Fp_p_id%253D110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN%2526p_p_lifecycle%253D0%2526p_p_state%253Dnormal%2526p_p_mode%253Dview%2526p_p_col_id%253Dcolumn-1%2526p_p_col_count%253D1&_110_INSTANCE_I6NwA8DioHgN_fileEntryId=93552126
69. IDEAM (2016). IMPACTO DEL FENÓMENO “EL NIÑO” 2015-2016 EN LOS NEVADOS Y ALTA MONTAÑA EN COLOMBIA. Tomado el 10 de Septiembre: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/132669/Impacto+de+El+Ni%C3%B1o+en+la+alta+monta%C3%B1a+colombiana.pdf/dd41d158-0944-41d5-917e-44fdb524e8ea>

70. IDEAM (2017). Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2017. Primera Edición. Bogotá, D.C., 2018. Tomado de http://www.andi.com.co/Uploads/Informe_ECalidadl_Aire_2017_636748401757382604.pdf
71. IDEAM (2018). La Variabilidad Climática y el Cambio Climático en Colombia. 4. Los Patrones Climatológicos Sobre el Territorio Colombiano. 4.1. Distribución de la temperatura media del aire. Tomado el 3 de Octubre de 2019: <http://www.andi.com.co/Uploads/variabilidad.pdf>
72. IDEAM (s.f.) Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Tomado el 5 de Marzo de 2019: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>
73. IDEAM, (2007). Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del rio Tunjuelo. Tomado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>
74. IDEAM, Alcaldía Mayor de Bogotá. Prevención y Atención de Emergencias. Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. 116 páginas. Tomado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>
75. IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Alexander Von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP (2014). Evolución de precipitación y temperatura durante los fenómenos el Niño y la Niña en Bogotá - Cundinamarca. Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC). Tomado de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosMarinosCosterosyRecursosAcuatico/NI%C3%91O_Y_NI%C3%91A.pdf
76. INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2007). Informe de actividades 2007. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
77. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2005). Atlas Climatológico de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
78. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2017). Atlas de viento de Colombia. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia 2017. Tomado el 5 de marzo de 2019: <http://www.andi.com.co/Uploads/VIENTO.compressed.pdf>
79. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2015). ESTUDIOS TÉCNICOS, ECONÓMICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES COMPLEJO DE PÁRAMOS ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE. Tomado el 26 de Septiembre de 2019: <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9484/13-13-014-188%20CE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
80. Janota, T. (2015). Alexander von Humboldt, un explorador científico en América. Editorial Cidcli. México.
81. K-2 INGENIERIA LTDA (2005). Modelación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Para Fuentes Fijas. p.74
82. Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woolten, J., Zhu, Y., Chellian, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jene, R. y Joseph, D. (1996): "The NCEP/ NCAR 40-year Reanalysis Project", Bulletin of the American Meteorological Society, 77, pp. 437-471.

83. Klister, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., Van del Dool, H., Jenne, R. y Fiorino, M. (2001): "The NCEP NCAR 50 year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and documentation", Bulletin of the American Meteorological Society, 81, pp. 247-267. Rusticucci, M. M. y Kousky V. E. (2002): "A comparative study of maximum and minimum temperatures over Argentina: NCEPNCAR Reanalysis versus station data", American Meteorological Society, 15, pp. 2089-2101.
84. Krewski, D. Rainham, D. (2007) Environmental Air Pollution and Population Health: Overview. McLaughlin Centre for Population Health Risk Assessment, Ottawa, Ontario, Canada: University of Ottawa, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 70: 275–283, 2007. Tomado el 25 de Febrero de 2019: https://cdn.dal.ca/content/dam/dalhousie/pdf/faculty/science/emaychair/Publications%20Section/Emay_Krewski_rainham_2007.pdf
85. Kuo, Y. H., Skumanich, M., Haagerson, P. L. y Chang, J. S. (1985). The Accuracy of Trajectory Models as Revealed by the Observing System Simulation Experiments. National Center for Atmospheric Research. American Meteorological Society. Boulder, Colorado. Tomado el 13 de octubre de 2019: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200493%281985%29113%3C1852%3ATAOTMA%3E2.0.CO%3B2>
86. León, G. (2010). ASPECTOS DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA DE GRAN ESCALA SOBRE EL NOROCCIDENTE DE SURAMÉRICA ASOCIADA AL CICLO ENOS 2009-2010 Y SUS CONSECUENCIAS EN EL RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA. Tomado el 10 de Septiembre: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf
87. Magaña, V., & Caetano, E. (2007). Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
88. Meteoblue (2018). Atmósfera. Tomado el 22 de Marzo: <https://content.meteoblue.com/es/meteoscool/la-tierra/atmosfera>
89. Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). Enfermedad Pulmonar obstructiva crónica - EPOC. Subdirección de enfermedades no transmisibles. Tomado el 4 de Abril del 2019: <https://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/epoc.pdf>
90. Montealegre J.E., (2007): Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia. Contrato No 063 IDEAM – Bogotá, Colombia.
91. Montealegre, J. E. (2009). ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ASOCIADA A PROCESOS OCEÁNICOS Y ATMOSFÉRICOS DE MESO Y GRAN ESCALA. Tomado el 16 de Septiembre: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+clim%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>
92. Montealegre, J. E. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. IDEAM. Tomado el 16 de Septiembre: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>
93. Montealegre, J.E. y Pabón, J.D. (1998): Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno frío del Pacífico (La Niña). Nota Técnica IDEAM-METEO/ 007-98: 1-19. Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras. Bogotá, Colombia.

94. N.A. (2007). Geografía de Colombia: Clima. Tomado en 25 de Febrero de 2019: <https://geografia.laguia2000.com/climatologia/colombia-clima>
95. N.A. (2012). Diagnóstico Ambiental Local Puente Aranda.
96. Nevers, N. (1998). Ingeniería de control de la contaminación del aire /por Noel de Nevers y traducción de José Hernán Pérez C. Editorial McGraw-Hill, 1998.
97. NOAA- National Oceanic and Atmospheric Administration (2018) What is El Niño? Tomado el 30 de Agosto de: <https://www.pmel.noaa.gov/el-nino/what-is-el-nino>
98. Organización Mundial de la Salud (2019) Ambient (outdoor) air quality and health. Tomado el 25 de Febrero de 2019: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
99. Ortiz, E. Y. (2016) Medición y caracterización de la turbulencia atmosférica en Bogotá y su influencia en la dispersión de contaminantes. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C. Tomado el 3 de Octubre de 2019: <http://bdigital.unal.edu.co/55987/7/EdisonYesidOrtizDur%C3%A1n.2016.pdf>
100. Palacio, D., Zafra, C. y Rodríguez, J. (2014) Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia). Revista Facultad de Ingeniería, [S.l.], n. 71, p. 153-166, feb. 2014. ISSN 2422-2844.
101. Parques Nacionales Naturales de Colombia-PNNC (2009). Sistema de Parques Nacionales Naturales. Tomado el 29 de Septiembre de 2019: <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-natural-paramillo/>
102. Pereira, A. (2017) Calidad del aire y enfermedades respiratorias: diagnóstico de estrategias públicas desarrolladas en el distrito. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Ingeniera Ambiental. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales.
103. Piedrahita Alfonso, J.C. (2014) Puente Aranda: una nueva cara a la ciudad. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Diseño. Programa de Arquitectura, Bogotá D.C., junio de 2014. Tomado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2140/1/Puente-Aranda-una-nueva-cara-a-la-ciudad.pdf>
104. Pirjola, L. T., Lähde, J., Niemi, A., Kousa, T., Rönkkö, P., Karjalainen, J., Keskinen, A. y Frey, R.H. (2012) Spatial and Temporal Characterization of Traffic Emissions in Urban Microenvironments with a Mobile Laboratory. Atmos. Environ. Vol. 63. 2012. pp. 156-167.
105. Ramírez, O (2013) Origen de masas de aire en cuatro ciudades de Colombia mediante el modelo HYSPLIT. Colombia. Universidad Internacional de Andalucía. Universidad de Huelva, Vol. 5, Núm. 1.
106. Recio, C. (2017) Análisis comparativo de las mediciones de concentración de material particulado menor a 10 micras (pm10) y evaluación de la calidad de aire de la localidad de puente aranda en los últimos 3 años. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería.
107. Red de Monitoreo de la Calidad del aire de Bogotá. (2008). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá. Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual. Alcaldía Mayor de Bogotá.
108. Red de Monitoreo de la Calidad del aire de Bogotá. (2019). Multi Station Report. tablas dinámicas en tiempo real de todos los contaminantes y parámetros meteorológicos de la RMCAB. Tomado el 23 de marzo de 2019 <http://201.245.192.252:81/>
109. Retallack, B. (1975) Compendio de Apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV. Volumen II - Meteorología. Ginebra Suiza.

110. Retallack, B. J. (1973). Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase iv. Publicación Organización Meteorológica Mundial OMM - 266. Vol. I. Ginebra, Suiza.
111. Rodríguez, Á. (2016). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. México: Gaceta Parlamentaria: Número 4506 - VII. Obtenido de <http://gaceta.diputados.gob.mx/Black/Gaceta/Anteriores/63/2016/abr/20160412-VII/Iniciativa25.html>
112. Rojas, N. (s.f.) Aire y problemas ambientales de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.
113. Ruíz, J., Serna, J. y Zapata, H. J. (2017). Atlas de Viento de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia 2017.
114. Sabogal, J. (26 de octubre de 2018). Por contaminar el aire, sellan cuatro empresas en Puente Aranda. *RCN Radio*. Tomado de <https://www.rcnradio.com/bogota/por-contaminar-el-aire-sellan-cuatro-empresas-en-puente-aranda>
115. Sánchez, V. y Castillejo, M. (1984). Estudio de los efectos del medio ambiente sobre la salud humana en el Valle de México. Colegio de México. México D.F.
116. Secretaría de Gobierno (2008). Documentos de Seguridad. Planes y Diagnósticos de Seguridad Localidad 16 - Puente Aranda. Tomado el 13 de octubre de 2019: http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Localidades/Puente_Aranda/Diagnostico_Seguridad_PuenteAranda-Alcaldia_Mayor.pdf
117. Secretaría de Hacienda (2004) Localidad de Puente Aranda. Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático Caracterización General de Escenarios de Riesgo. Alcaldía de Puente Aranda. Bogotá. Tomado el 25 de Febrero de 2019: <http://www.idiger.gov.co/documents/220605/263911/Identificacion+y+Priorizacion.pdf/626e6cc1-33f7-4174-8c97-a0ca8637e593>
118. Secretaría de Hacienda (2004). Recorriendo Puente Aranda. Diagnóstico físico y socioeconómico de las localidades de Bogotá, D.C. Tomado el 25 de Febrero de 2019: <http://www.shd.gov.co/shd/sites/default/files/documentos/Recorriendo%20PUENTE%20ARANDANDA.pdf>
119. Secretaría Distrital de Ambiente –SDA-. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. – RMCAB (2010). Informe Trimestral de Calidad del Aire de Bogotá Primer Trimestre 2010. Bogotá, D.C. julio de 2010. 94 páginas. Tomado de http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Calidad_Aire_Bogota/Calidad_Aire_Bogota_Informe_Trimestre_1-SDA-2010.pdf
120. Secretaría Distrital de Ambiente –SDA-. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. – RMCAB (2011). Informe Trimestral de Calidad del Aire de Bogotá Primer Trimestre 2011. Bogotá, D.C. enero de 2012. 169 páginas. Tomado de http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Calidad_Aire_Bogota/Calidad_Aire_Bogota_Informe_Trimestre_3-SDA-2011.pdf
121. Secretaría Distrital de Ambiente –SDA-. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. – RMCAB (2019). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá 2018. Bogotá, D.C. julio 2019. 131 páginas. Tomado de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dml_download&p=13003
122. Secretaría Distrital de Ambiente –SDA-. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. – RMCAB (2016). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá 2015. Bogotá, D.C. julio 2016. 171 páginas. Tomado de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dml_download&p=3205

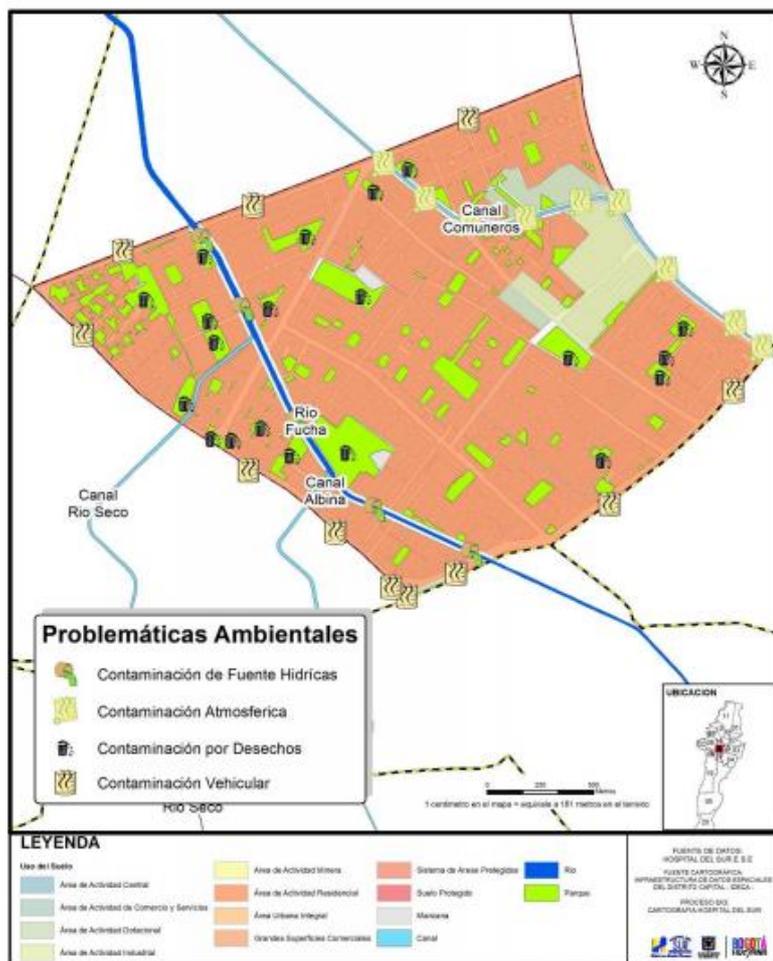
123. Secretaría Distrital de Ambiente (2011). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá. Año 2010. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.
124. Secretaría Distrital de Ambiente (2016). Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá. Año 2015. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.
125. SIAC. (2014). Sistema de información ambiental de Colombia. Obtenido de SIAC: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=587&conID=622>
126. Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., & Cohen, M. D. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *American Meteorological Society*, 2059-2078.
127. Sudalma, S, Purwantoa, P y Langgeng W, S. (2014). The Effect of SO₂ and NO₂ from Transportation and Stationary Emissions Sources to SO₄²⁻ and NO₃⁻ in Rain Water in Semarang. *International Conference on Tropical and Coastal Region Eco-Development 2014 (ICTCRED 2014)*. *Procedia Environmental Sciences* 23 (2015) 247 – 252.
128. Tai-YiYu Len-Fu W.Chang, (2001). Delineation of air-quality basins utilizing multivariate statistical methods in Taiwan. *Atmospheric Environment* 35(18):3155-3166.
129. Terra, R; Necco, G; Ungerovich, M. (2011). Elementos de Meteorología y clima 2011. *Circulación General de la Atmósfera. Componente de Circulación del Clima. Bolilla IV -2*. La Universidad de la República, Uruguay.
130. The Conference Board of Canada (2013). Nitrogen Oxides Emissions. Tomado el 13 de octubre de 2019: [https://www.conferenceboard.ca/\(X\(1\)S\(gzwqavq3zjcjfmrvakc5z4qr\)\)/hcp/Details/Environment/urban-nitrogen-dioxide-concentration.aspx?AspxAutoDetectCookieSupport=1](https://www.conferenceboard.ca/(X(1)S(gzwqavq3zjcjfmrvakc5z4qr))/hcp/Details/Environment/urban-nitrogen-dioxide-concentration.aspx?AspxAutoDetectCookieSupport=1)
131. Tropical Rainfall Measuring Mission (2019). Latest 3 Hourly Rain. Tomado el 23 de Marzo del 2019: https://trmm.gsfc.nasa.gov/publications_dir/regional_americas.html
132. UNGRD - Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres-Colombia (2016). Fenómeno El Niño. *Análisis Comparativo 1997-1998//2014-2016*. Bogotá.
133. Unidad de Servicios de Salud Sur (2016). Boletín Epidemiológico Mensual de la Línea Aire, Ruido y Radiación Electromagnética. Tomado el 16 de Agosto del 2019: <https://www.subredsuroccidente.gov.co/sites/default/files/vigilancia-salud-ambiental/11.%20BOLETIN%20UPSS%20SUR%20129%20NOVIEMBRE%202016.pdf>
134. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs-OCHA (2010). Temporada de lluvias 2010. Fenómeno de La Niña. Tomado el 10 de Septiembre de: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/ED805BA5D0EC9FE4852577F2007ED585-Informe_completo.pdf
135. Universidad de La Salle (2004). Diagnóstico ambiental local Puente Aranda. Tomado el 25 de Febrero del 2019: [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Diagnostico_Ambiental_Puente_Aranada%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/Diagnostico_Ambiental_Puente_Aranada%20(4).pdf)
136. Universidad Militar de Paraná (2018). Emissions and impact on air quality of particulate matter and black carbon in Curitiba, Paraná, Brazil. Tomado el 10 de Marzo del 2019: https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.131504!/ParCur_report_phase_1_final.pdf
137. Uribe, L. y Suárez, N. (2009) Evaluación de la calidad del aire del Valle de Sogamoso, respecto a material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), aplicando el modelo de dispersión AERMOD como herramienta de planificación. Universidad de la Salle.
138. Vergara, L. (2015). Informe Mensual: diciembre de 2015. Eventos hidrológicos Extremos en la Amazonía Peruana: Sistema de Alerta para la Previsión. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú. Tomado el 3 de octubre de 2019: http://snirh.ana.gob.pe/vamazonia/Reportes/2015_12_Reporte_Diciembre.pdf

139. Wang, J. y Ogawa, S. (2015). Effects of Meteorological Conditions on PM2.5 Concentrations in Nagasaki, Japan. *Int J Environ Res Public Health*. 2015 Aug; 12(8): 9089–9101. Published online 2015 Aug 3.
140. Wang, Y, Stein, A. F. Draxler, R. R. De la Rosa, J. Draxler, R. R., (2011) Global sand and dust storms in 2008. Observation and HYSPLIT model verification. *Atmospheric Environment* 45(6368):6381.
141. Weather Spark (2018). Average Weather in Bogotá Colombia. Tomado el 23 de marzo del 2019: <https://weatherspark.com/y/23324/Average-Weather-in-Bogot%C3%A1-Colombia-Year-Round>
142. World Health Organization. Regional Office for Europe & Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. (2006). Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe. Tomado de http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf
143. Yang L., Ye, W., Jerry, M.D. y Hao, J.M. (2011) Estimating the effects of meteorology on PM2.5 reduction during the 2008 summer Olympic games in Beijing, China. *Front. Environ. Sci. Engin. China*. 2011; 5:331–341.
144. Yerramilli, A. Bhaskar Rao Dodla, V. y Srinivas, V. (2011) An integrated WRF/HYSPLIT modeling approach for the assessment of PM2.5 source regions over the Mississippi Gulf Coast region. *Air Qual Atmos Health* (2012) 5: 401.
145. Zambrano, E. (1986). El fenómeno de El Niño y la Oscilación Sur (ENOS). *Acta Oceanográfica del Pacífico* 3 (1): 195-203.
146. Zannetti, P. (1990). Air pollution modeling: theories, computational methods, and available software (p. 444). Southampton: Computational Mechanics

14. ANEXOS

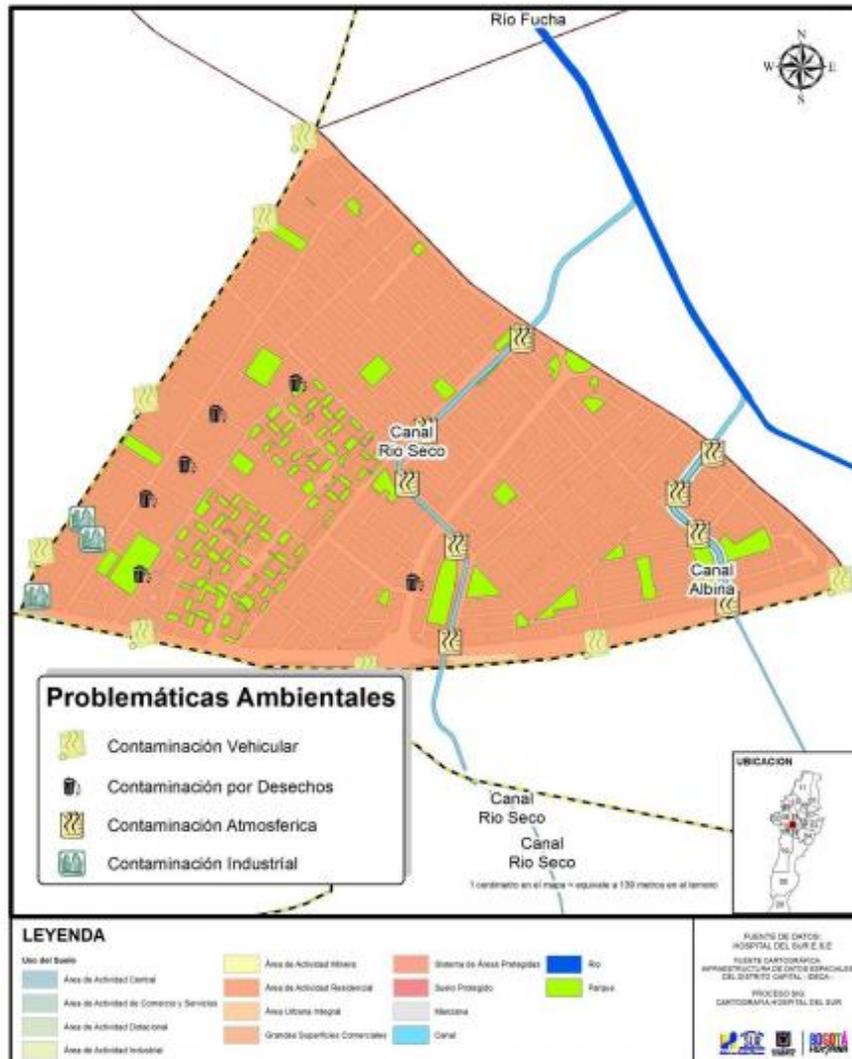
14.1 ANEXO 1. "Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – Ciudad Montes"

MAPA 38 Problemáticas ambientales de Ciudad Montes, UPZ 40.



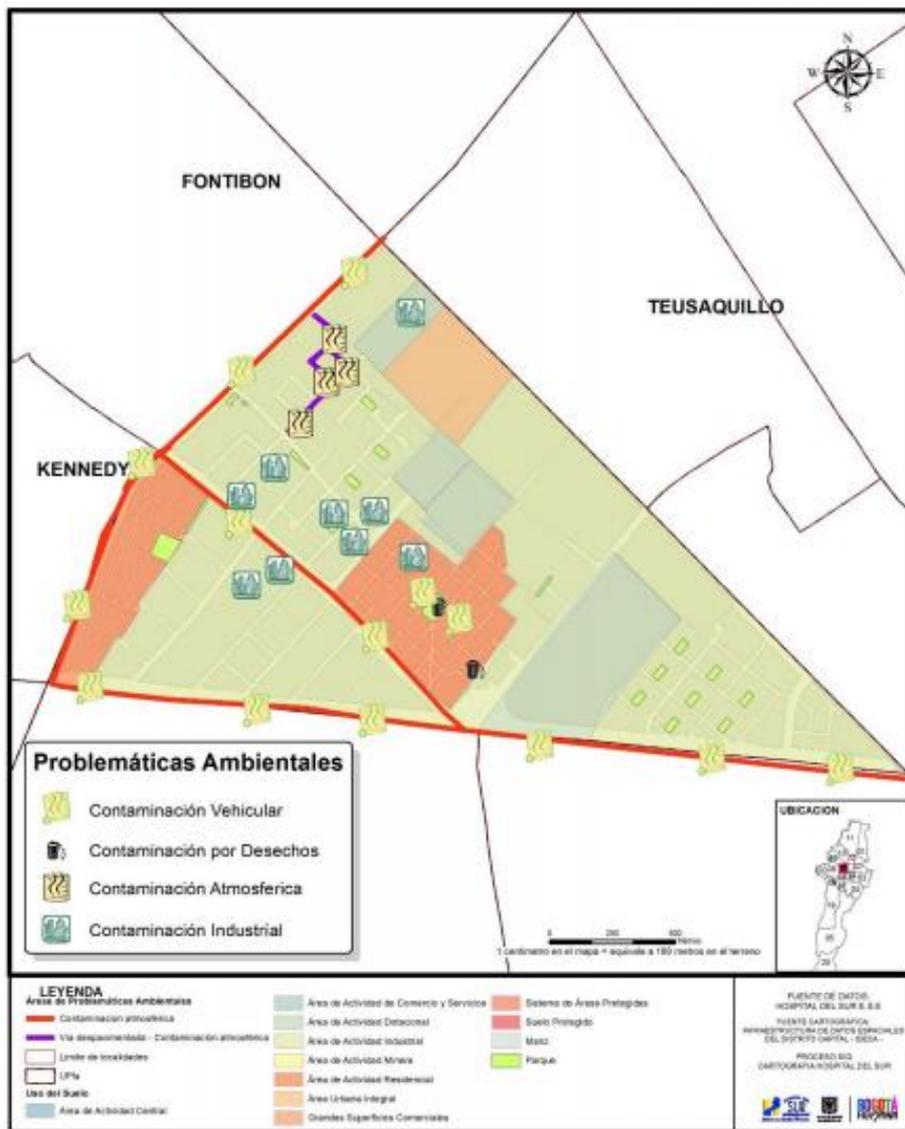
14.2 ANEXO 2." Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – Mazu"

Mapa 39- – Problemáticas Ambientales, Muzu – UPZ 41.



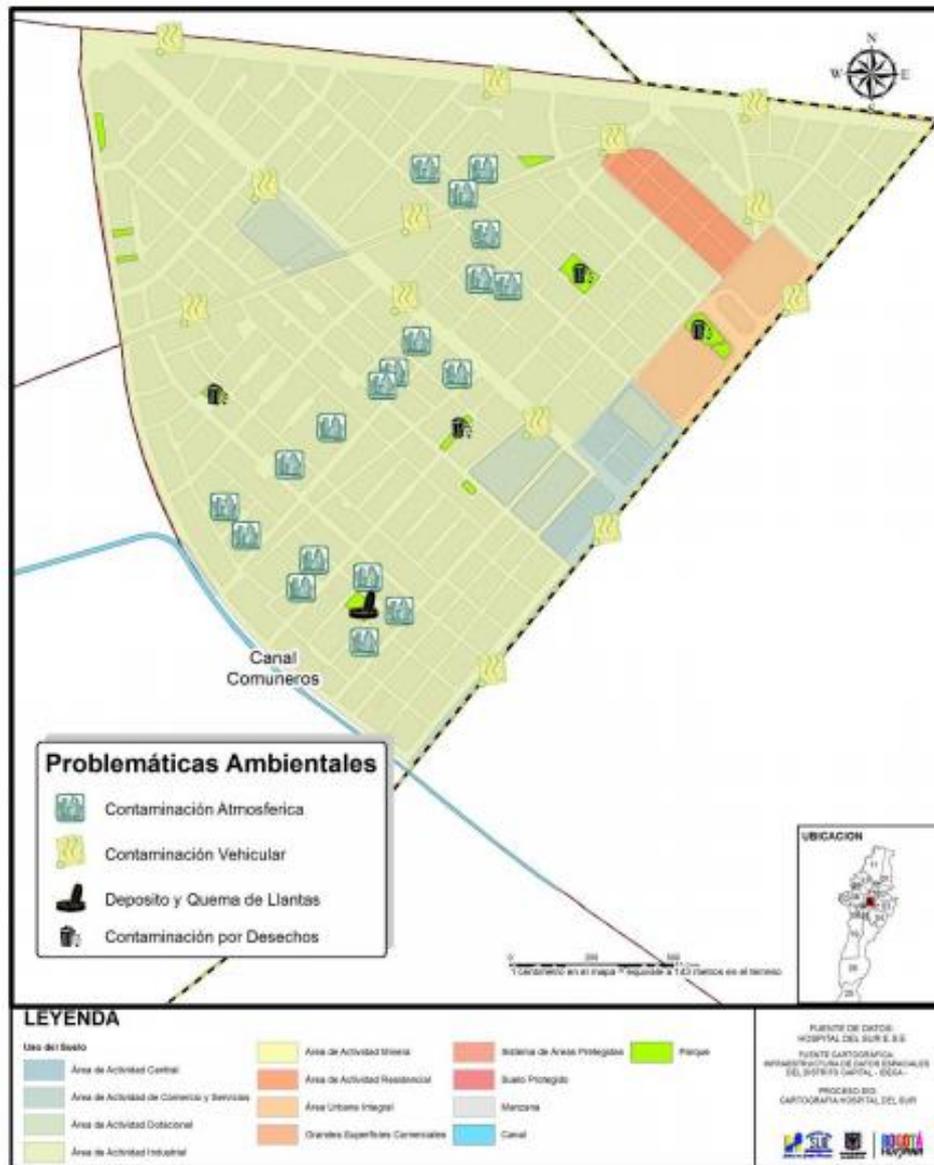
14.3 ANEXO 3." Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – San Rafael"

Mapa 41 – Problemáticas Ambientales, San Rafael – UPZ 43.

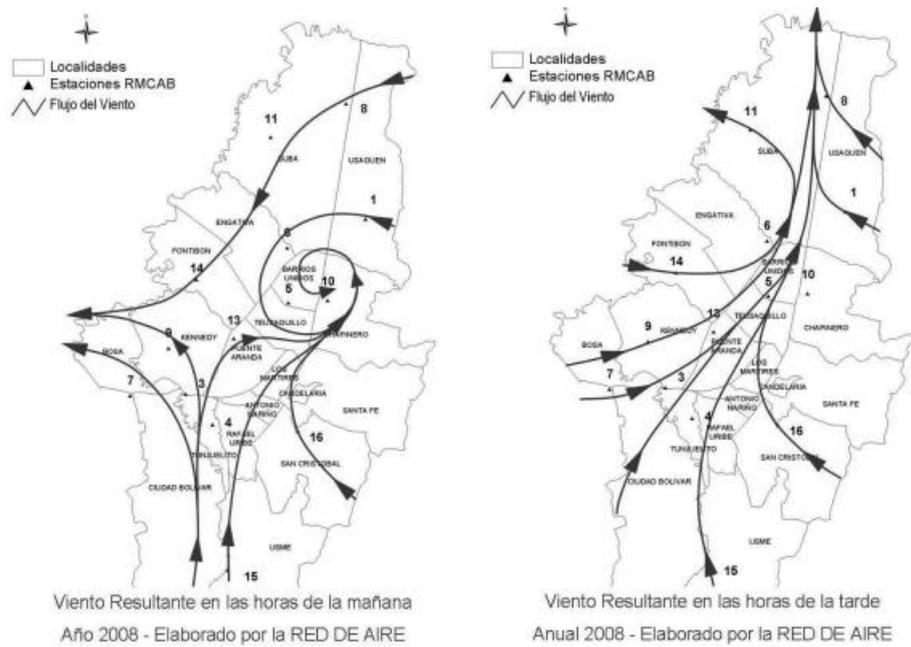


14.4 ANEXO 4." Mapas con industrias Puente Aranda relacionada con problemática ambiental de calidad del aire – Zona Industrial"

Mapa 42 – Problemáticas Ambientales, Zona Industrial – UPZ 108.

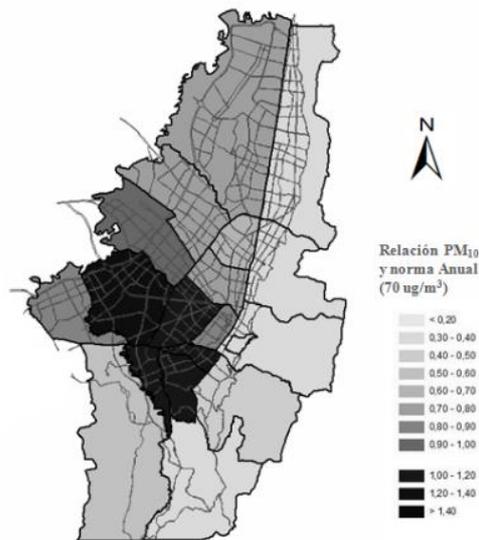


14.5 ANEXO 5."Flujo de vientos promedio durante la mañana y la tarde en el 2008"



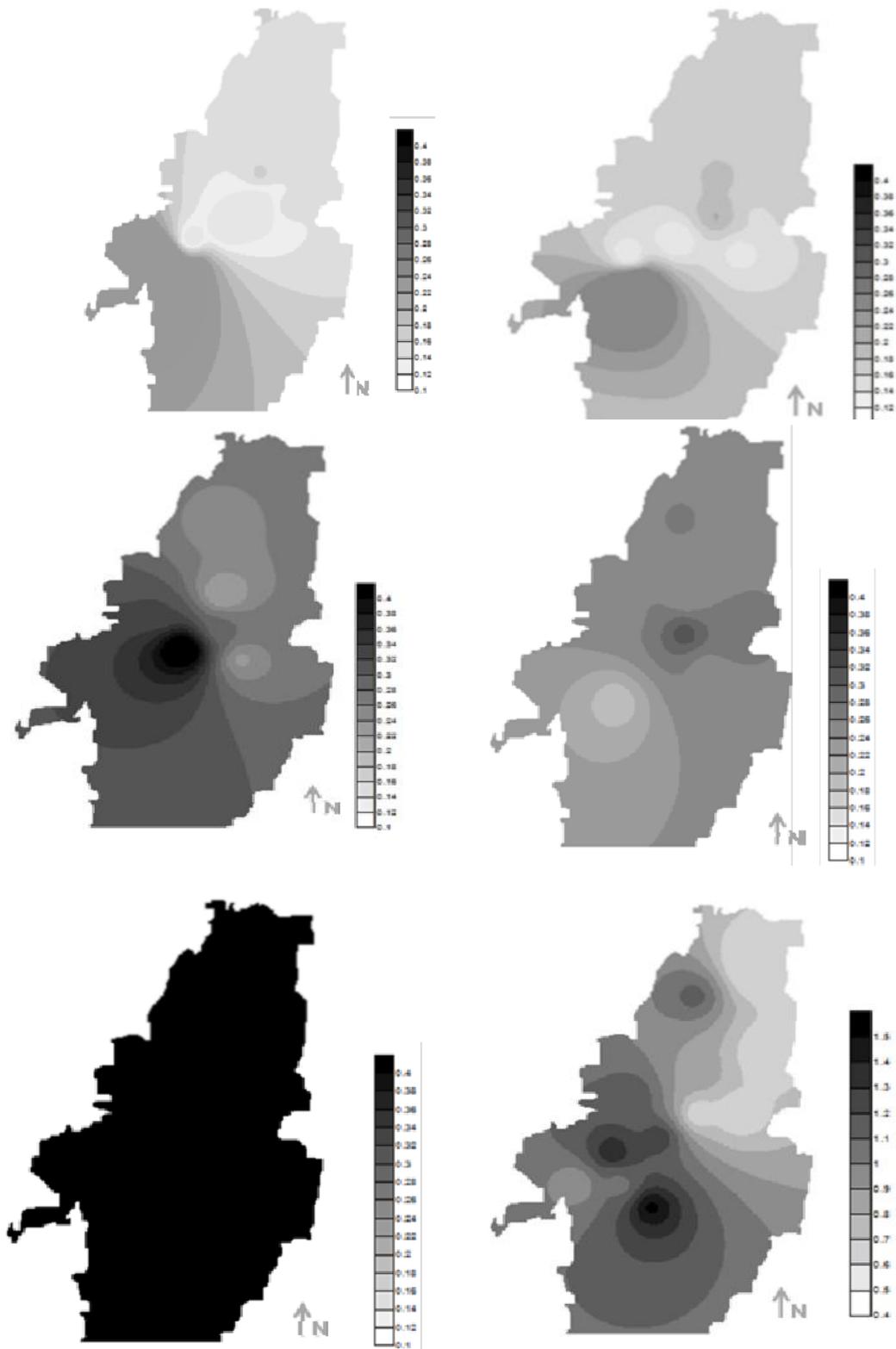
Fuente. RED AIRE, 2008

14.6 ANEXO 6."Mapa de contaminación por material particulado por



Fuente. Grupo de Sostenibilidad Urbana. Universidad de los Andes. Gaitán, M & Behrentz, E; 2009

14.7 ANEXO 7."Mapa de isoconcentración de CO, SO2, NO2, O3, PM10, PM10 (respectivamente) en Bogotá año 2006 Escala"



Fuente. Gaitán, M. 2007 Universidad de los Andes

14.8 ANEXO 8."Documento de consignación de datos en formato Excel"



(Remitirse a link en drive “Consignación de datos Puente Aranda/ Climogramas”)

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1vWcQs8JV2D0Xtsf5LyYXPBVL727QluGaROkCw6cTruM/edit?usp=sharing>

- Hoja 1-11. Datos meteorológicos de la localidad de Puente Aranda y Bogotá por año, mes, día, hora en el rango de 2009-2019
- Hoja 12. Cálculo del índice porcentual de excedencias de la norma y consignación de los datos ambientales promediados
- Hojas 17-25. Cálculo de figuras 23 a 25. Del documento.
- Hoja 26. Consolidado de cálculo de gráficas de contaminación contempladas en figuras 26 a 36. Del documento.

15. Glosario de términos

- **Cuenca atmosférica:** Región geográfica, delimitada por los obstáculos topográficos de origen natural. Los contaminantes atmosféricos de fuentes de contaminación se encuentran dentro del área de flujo presentes en el aire. (Camelo Olarte, D y Valbuena Chávez, L. 2017)
- **Modelo HYSPLIT:** Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única. Sirve para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire. Es muy útil para efectos de interpretar un evento que afecta la calidad del aire y análisis de trayectorias regresivas.
- **Salud pública:** Conjunto de condiciones mínimas de salubridad de una población determinada, que los poderes públicos tienen la obligación de garantizar y proteger. (RAE, 2019)
- **Enfermedad respiratoria aguda (ERA):** Son un grupo de enfermedades que se producen en el aparato respiratorio.
- **Epidemiología:** Estudio de la frecuencia y de la distribución de las enfermedades. (UNESCO, 2010)
- **Masas de aire:** Gran volumen de aire cuyas propiedades físicas de temperatura, humedad y gradiente térmico vertical, presentan una estructura homogénea en toda la extensión de la masa de aire. Los factores que influyen en las propiedades de las masas de aire son la naturaleza u origen, la dirección del movimiento y los cambios que puedan suscitarse debido a la superficie en la que se encuentran (Hernández, 2012).
- **Ordenamiento territorial:** El ordenamiento territorial es un proceso que involucra directamente a los grupos sociales, ya que es en el territorio donde tienen lugar sus actividades cotidianas. Es instrumento del Estado para ejercer control sobre el territorio y orientar un determinado modelo de desarrollo. (Hernández Peña, Y. 2010)
- **Material particulado:** Conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros, 1999).
- **Temperatura:** Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K). (RAE, 2019)
- **Precipitación:** Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra. (RAE, 2019)
- **Meteorología:** Ciencia que estudia los fenómenos atmosféricos. (RAE, 2019)
- **Humedad relativa:** Expresión porcentual de la cantidad de vapor de agua presente en el aire con respecto a la máxima posible para unas condiciones dadas de presión y temperatura. (RAE, 2019)
- **Vientos:** Corriente de aire producida en la atmósfera por causas naturales, como diferencias de presión o temperatura. (RAE, 2019)
- **Tasa de mortalidad:** Medida de la frecuencia de muertes en una población definida durante un período de tiempo dado. (RAE, 2019)