



# **Evaluación ambiental de episodios de contaminación atmosférica en Bogotá Región durante el año 2021 empleando el modelo HYSPLIT**

Diana Paola Ovalle González

Trabajo entregado para la obtención del grado de  
**Máster en Tecnología ambiental**

Modalidad: Investigación

Línea 5 de investigación: Contaminación atmosférica

Septiembre / 2022

Director:

D. Raúl Arasa Agudo

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios,*

*A mis papás*

*Al Dr. Raúl Arasa por su conocimiento, tiempo y dirección*

*A la Fundación Carolina por la oportunidad dada de continuar mi crecimiento profesional,*

*Al MSc. Nikolay Agudelo por ser ejemplo y promover en mí el espíritu investigador y académico*

El **D. Raúl Arasa Agudo** con DNI: 38124658L, Director de operaciones de Meteosim S.L.

**INFORMA:**

Que el trabajo titulado **“Evaluación ambiental de episodios de contaminación atmosférica en Bogotá región durante el año 2021 empleando el modelo HYSPLIT”** presentado por **D. Diana Paola Ovalle González, con pasaporte AT894465**, ha sido realizado utilizando herramientas de **“Meteosim S.L.”**, bajo mi dirección, y autorizo su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: Trabajo de Investigación), para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva.

En Huelva, a 19 de septiembre de 2022

A handwritten signature in black ink, reading "Raúl Arasa", enclosed within a large, loopy oval shape.

Fdo.: Raúl Arasa Agudo



## RESUMEN

Bogotá región es el sexto centro poblacional más grande de Latinoamérica, donde conviven alrededor de nueve millones de habitantes con más de 88.000 tipos de industrias, asimismo, es el que más sufre de baja calidad del aire en Colombia.

El presente trabajo se inicia evidenciando si los episodios de contaminación atmosférica, que se definen para el presente estudio como la superación por más de 3 días continuos a la normatividad ambiental colombiana (Resolución 2254 de 2017) de los contaminantes criterio primarios (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, SO<sub>2</sub> y CO) durante 2021, provienen de fuentes fijas y descartar o establecer con cierto grado de probabilidad y certeza de sus resultados, el posible origen de estos.

Para el análisis de los episodios se emplea el modelo HYSPLIT adaptado por Meteosim SL que utiliza la meteorología de la zona de estudio con una resolución de 1x1 km<sup>2</sup> para describir el posible recorrido que hacen las emisiones según el régimen de vientos para la hora del evento (pico con mayor registro de superación a la norma). Para la evaluación, se toma la hora de interés  $\pm 1$  hora y se simulan retrotrayectorias de 3 horas a una altura de 2 m desde la estación donde se reporta el episodio de contaminación ambiental en los 8 eventos seleccionados, con el objeto de observar si pasan por encima, a una altura razonable, de alguno de los 25 polígonos industriales identificados, y así poder definir la incidencia de fuentes fijas en el evento.

Los resultados arrojan que, primeramente, no se encuentran superaciones a la norma de monóxido de carbono en ninguna de las 29 estaciones de calidad del aire válidas y empleadas para el estudio. El contaminante PM<sub>10</sub> es el que mayor incidencia tiene en la baja calidad del aire de Bogotá región con 29 de los 62 episodios reconocidos, asimismo, la estación ubicada en el suroeste de Bogotá, Carvajal – Sevillana CSE es la que registra, para todos los contaminantes de interés del presente estudio, alrededor del 74% de los episodios de contaminación atmosférica durante el 2021. Los meses de septiembre, mayo, y octubre son los que mayor número de episodios presentan, mientras que marzo y julio son los que reportan episodios más largos. La incidencia de los polígonos industriales identificados en los eventos seleccionados presenta una probabilidad alta en el 50% de ellos, baja en uno de ellos y nula en el 37,5% de ellos, y en general, el 75% de los análisis generados a partir de las retrotrayectorias conjuntas evidencian la baja incertidumbre de los eventos, dando fiabilidad de los resultados obtenidos e hipótesis generadas de los posibles focos industriales que pudieron haber generado las concentraciones por encima de la norma de los contaminantes de interés. En conclusión, los resultados obtenidos de las simulaciones son acertados para la evaluación de episodios de contaminación atmosférica y el descarte de posibles

fuentes fijas emisoras con alta fiabilidad, asimismo, se evidencia la necesidad de implementar planes, programas y mejoras a el sistema de vigilancia en ciertas zonas de Bogotá región.

**Palabras clave:** HYSPLIT, episodios de contaminación atmosférica, retrotrayectorias, Bogotá región, contaminantes criterio primarios.

## ABSTRACT

Bogota region is the sixth largest population center in Latin America, where about nine million inhabitants live with more than 88,000 types of industries, also, it is the largest region suffering from low air quality in Colombia. To establish if air pollution episodes, defined for the current study as the overcoming by more than 3 continuous days to Colombian environmental regulations (Resolution 2254 of 2017) of the primary criteria pollutants (PM10, PM2,5, SO2 and CO) evidenced by 2021, came from fixed sources and exclude or establish with some degree of probability and uncertainty the possible origin of these. HYSPLIT model adapted by Meteosim SL was used which employ the meteorology of the study area with a resolution of 1x1 km to describe the possible route that wind regime makes for the time of the event (peak with greater record of exceeding the standard). To evaluate, it is taken the interest hour and 3-hour back trajectories are simulated at a height of 2 m from the station where the environmental pollution episode is reported in the 8 selected events. To observe if they pass over, at a reasonable height, from one of the 25 industrial sites identified, and be able to define the fixed sources incidence in the event. Results show that, firstly, there are no exceedances from carbon monoxide standard in any of the 29 valid air quality stations used for the study. PM10 pollutant has the highest incidence in the low air quality of Bogotá region with 29 of the 62 recognized episodes, likewise, the air quality station located in the southwest of Bogotá, Carvajal - Sevillana CSE is the one that reports, including all the pollutants of interest, around 74% of the air pollution episodes identified during 2021. September, May, and October report the highest number of episodes, while March and July are the ones reporting longer episodes. Industrial parks' incidence identified in the selected events present a high probability in 50% of them, low in one of them and zero in 37.5% of them, and in general, 75% from joint back trajectories show the low uncertainty of the events, therefore, the study results and hypotheses generated from the possible industrial outbreaks that could have generated concentrations above the pollutant norm of interest are reliable. In conclusion, evaluation of air pollution episodes and discarding possible stationary sources demonstrate high reliability, as well, it was identifying the need to implement plans, programs, and improvements to the monitoring system in certain areas of Bogota region.

**Key words:** HYSPLIT, air pollution episodes, back trajectory, Bogotá region, primary criteria pollutants.





# ÍNDICE

RESUMEN.....	5
ABSTRACT .....	7
ÍNDICE .....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE ANEXOS .....	14
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Estado del arte.....	17
1.2. Ubicación geográfica.....	19
1.3. Normatividad colombiana.....	20
1.4. Objetivos .....	21
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.1. Información meteorológica.....	23
2.2. Información de calidad del aire .....	23
2.2.1. Estaciones objeto de interés .....	29
2.2.2. Posibles focos de contaminación en Bogotá región .....	34
2.3. Modelo HYSPLIT .....	36
2.4. Metodología de análisis.....	37
2.4.1. Selección de los episodios de contaminación.....	38
2.4.2. Análisis de los resultados .....	48
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	51
3.1. Retrotrayectorias.....	51
3.2 Resumen de los resultados obtenidos .....	68
3.3 Discusiones.....	70
CONCLUSIONES.....	73
REFERENCIAS .....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de Bogotá región. Fuente propia, 2022. ....	19
Figura 2. Número de superaciones por tipo de estación y contaminante en Bogotá región. Simbología: 1. Verde: no presenta superaciones a la norma, 2. Amarillo: presenta de 1 a 6 superaciones (tamaño mediano), 3. Rojo: Presenta más de 6 superaciones a la norma (tamaño grande). Fuente: elaboración propia, 2022.....	31
Figura 3. Ubicación geográfica de los polígonos industriales identificados en Bogotá región. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	35
Figura 4. Análisis horario del comportamiento de los niveles PM10, estación CSE. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	41
Figura 5. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM10, estación EFZ. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	42
Figura 6. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM10, estación SOCOL. Fuente: Elaboración propia, 2022 .....	43
Figura 7. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM2,5, estación CSE. Fuente: Elaboración propia, 2022 .....	45
Figura 8. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM2,5, estación MOV. Fuente: Elaboración propia, 2022 .....	45
Figura 9. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM2,5, estación PTE. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	46
Figura 10. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM2,5, estación SOCOL. Fuente: Elaboración propia, 2022. ....	47
Figura 11. Análisis horario del comportamiento de los niveles de SO <sub>2</sub> , estación CSE. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	48
Figura 12. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 31/08/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	53
Figura 13. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 01/12/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	55
Figura 14. Retrotrayectoria conjunta para estación EFZ, 23/04/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	57
Figura 15. Retrotrayectoria conjunta para estación SOCOL, 12/07/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	59

Figura 16. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 19/11/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	61
Figura 17. Retrotrayectoria conjunta para estación PTE, 06/03/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	63
Figura 18. Retrotrayectoria conjunta para estación SOCOL, 26/03/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	65
Figura 19. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 16/07/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles máximos permisibles contaminantes criterio. Fuente: Resolución 2254 de 2017.....	21
Tabla 2. Contaminantes de interés según el tipo de estación. Fuente: MAVDT, 2008. ....	24
Tabla 3. Estaciones de calidad del aire y descripción general recopiladas para el estudio. Fuente: Elaboración propia, 2022. ....	26
Tabla 4. Información detallada por estaciones de número de superaciones, valores máximos, medios. Fuente: Elaboración propia, 2022. ....	32
Tabla 5. Información básica de los polígonos industriales identificados para Bogotá región. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	35
Tabla 6. Episodios de contaminación atmosférica en Bogotá región, primer filtro. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	38
Tabla 7. Eventos seleccionados para modelación en HYSPLIT, contaminante: PM10. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	44
Tabla 8. Eventos seleccionados para modelación en HYSPLIT, contaminante: PM2,5. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	47
Tabla 9. Definición de la probabilidad para las retrotrayectorias. Fuente: Elaboración propia, 2022.....	49
Tabla 10. Formato para el análisis de retrotrayectorias. Fuente: Elaboración propia, 2022. ....	50
Tabla 11. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 31 de agosto de 2021, contaminante PM10.....	52
Tabla 12. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 01 de diciembre de 2021, contaminante PM10.....	54
Tabla 13. Evaluación Retrotrayectoria estación EFZ, 23 de abril de 2021, contaminante PM10.....	56
Tabla 14. Evaluación Retrotrayectoria estación SOCOL, 12 de julio de 2021, contaminante PM10.....	58
Tabla 15. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 19 de noviembre de 2021, contaminante PM2,5.....	60

Tabla 16. Evaluación Retrotrayectoria estación PTE, 06 de marzo de 2021, contaminante PM2,5.....	62
Tabla 17. Evaluación Retrotrayectoria estación SOCOL, 26 de marzo de 2021, contaminante PM2,5.....	64
Tabla 18. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 16 de julio de 2021, contaminante PM2,5.....	66
Tabla 19. Resumen de la evaluación de los eventos seleccionados para el estudio. .....	68

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tablas descriptivas de las estaciones y polígonos industriales empleados para el presente estudio. Formato: Excel. Nombre del archivo: DATOS\_TFM

Anexo 2. Mapas de las figuras 2 y 3 del presente documento.

Anexo 3. Mapas de las retrotrayectorias y retrotrayectorias conjuntas generadas para el análisis de la simulación. Formato: PDF. Nombre del archivo: Nombre\_de\_la\_ficha\_del\_evento o Nombre\_de\_la\_ficha\_del\_evento\_conjunto

Anexo 4. Fichas de evaluación de los eventos seleccionados para la simulación y tabla resumen. Formato: Excel. Nombre del archivo: Eva\_Retrotrayectorias

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

BOG	Bogotá
BOL	Estación Bolivia, BOG.
BOS	Estación Bosa, BOG.
BRICEÑO	Estación Sopo - Briceño, REGIÓN.
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CAURB	Estación Calera - urbano, REGIÓN.
CBV	Estación Ciudad Bolivar, BOG.
CDAR	Estación Centro de Alto Rendimiento, BOG.
CEMODAE	Estación Madrid – CEMODAE, REGIÓN.
COL	Estación Colina, BOG.
COURB	Estación Cota - urbano, REGIÓN.
CSE	Estación Carvajal – Sevillana, BOG.
DLIA	Estación Mosquera – DLIA, REGIÓN.
EFZ	Estación Zipaquirá – EFZ, REGIÓN.
FTB	Estación Fontibón, BOG.
FUCOL	Estación Funza – colegio, REGIÓN.
FUSIS	Estación Funza – Sisbén, REGIÓN.
GYR	Estación Guaymaral, BOG.
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
JAZ	Estación Jazmín, BOG.
KEN	Estación Kennedy, BOG.
LFR	Estación Las Ferias, BOG.
MADS	Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible
MAM	Estación Ministerio de Ambiente, BOG.
MAVDT	Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial
MNS	Estación Cajicá – manas, REGIÓN.
MOV	Estación Móvil 7ma, BOG.
MOV2	Estación Móvil Fontibón, BOG.
PM10	Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 $\mu\text{m}$
PM2,5	Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2.5 $\mu\text{m}$
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
PTE	Estación Puente Aranda, BOG.
REGIÓN	Bogotá región, comprende los municipios: Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, Facatativá, Funza, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Sibaté, Soacha, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá.
RM CAB	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
SAUCES	Estación Sibaté – los Sauces, REGIÓN.
SCR	Estación San Cristóbal, BOG.
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SENA	Estación Mosquera – SENA, REGIÓN.
SISAIRE	Subsistema de Información Sobre Calidad del Aire
SOCOL	Estación Soacha - colegio, REGIÓN.
SUB	Estación Suba, BOG.
TIBITOC	Estación Tocancipá – Planta Tibitoc, REGIÓN.
TUN	Estación Tunal, BOG.

UMNG	Estación Cajicá – UMNG, REGIÓN.
UNIMINUTO	Estación Soacha - Uniminuto, REGIÓN.
USM	Estación Usme, BOG.
USQ	Estación Usaquén, BOG.
ZCOT	Zona industrial del municipio de Cota
ZCOT	Zona industrial del municipio de Cota
ZCSE	Frigorífico, industria de alimentos, automotriz.
ZCSE1	Industria automotriz, entre otros
ZCSE2	Industria de curtido de pieles
ZEFZ	Frigorífico, estación eléctrica
ZEFZ1	Industria de alimentos
ZFTB1	El Recodo, zona franca de Fontibón
ZFTB2	Polígono industrial frente al aeropuerto de Bogotá
ZFTB3	Puente grande
ZFTB4	Puente grande, sector 2
ZFTB5	Zonas de conecta y Álamos, Engativá
ZMDRD	Zona industrial del municipio de Madrid
ZMSQR	Zona industrial del municipio de Mosquera
ZMTV	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZPTE1	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZPTE2	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZPTE3	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZSO1	Zona industrial de Cazuca, Soacha
ZSO2	Zona industrial de cerámica, agregados y otros
ZSO3	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZSO3	Industria siderúrgica
ZSO4	Industria de cementos y agregados
ZSO5	Industria de municiones
ZSO6	Industria de vidrios
ZTNJO	Zona industrial del municipio de Tenjo



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Estado del arte

El avance de la sociedad y la tecnología han fomentado tanto el incremento de la población, como el desarrollo de actividades antrópicas a gran escala, como industrias, transporte, agricultura y ganadería. El grado de desarrollo de cierto lugar está directamente relacionado con la contaminación del aire (Franceschi et al., 2018), que dicho en otras palabras, es la alteración de la composición de la atmosfera generado por un aumento de la concentración de sustancias perjudiciales para la salud humana y ambiental de forma acelerada.

A nivel legislativo se define como contaminación atmosférica cuando las concentraciones de contaminantes criterio (sustancias de interés) medidos en cierta área se encuentran por encima de los niveles permisibles establecidos por unidad de tiempo (anual, diario, horario u octohorario) en la normatividad ambiental colombiana, la Resolución 2254 de 2017 (Niveles Calidad del Aire., 2017), que asimismo, define dichos contaminantes como, primarios: dióxido de azufre, monóxido de carbono, material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, y/o secundarios como el ozono, el dióxido de nitrógeno y material particulado (Julian et al., 2020).

Bogotá región, el sexto centro de población más grande de América Latina (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015), es el que más presenta contaminación del aire en Colombia. Alrededor de nueve (9) millones de ciudadanos que viven en Bogotá y su área metropolitana (DANE, 2005) presentan una necesidad de movilización que comprende largas distancias, altos tiempos de conducción, alto tráfico vehicular y desgaste de los discos de freno, lo que genera, entre otros contaminantes, concentraciones de Material Particulado (PM) que ascienden al 61% de la contaminación total generada de PM<sub>10</sub> en la región (MADS, 2019). Asimismo sucede con las industrias, en Bogotá región es posible encontrar alrededor del 33% de las empresas de Colombia, de las cuales un 23% corresponden a industria, construcción y actividad agropecuaria (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015), es decir, en Bogotá región coexisten con los habitantes alrededor de 88 mil industrias que generan residuos sólidos, líquidos y emisiones de gases y aerosoles continuamente, que en el caso de PM<sub>10</sub> representan el 39% de la generación total en la ciudad (MADS, 2019).

Dicha contaminación no es una problemática meramente local, puesto que los gases y/o aerosoles se pueden dispersar por largas distancias y pueden permanecer desde horas hasta días según condiciones meteorológicas, de temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento, entre otros (Rojano et al., 2021). Además, no es el

único factor que interviene, la topografía condiciona el transporte y tiempo de duración de dichas sustancias en la atmósfera.

A partir de la legislación vigente y los valores registrados de cada contaminante en el aire por la red de calidad del aire, es posible definir episodios de contaminación ambiental, que corresponden a periodos de baja calidad del aire evidentes, generados bien sea por condiciones meteorológicas no esperadas y/o por sucesos naturales o antrópicos debido a accidentes o eventos industriales donde se supera prolongadamente el límite permisible del contaminante de estudio (Brimblecombe, 2019).

Para analizar dichos episodios de contaminación ambiental se pueden utilizar técnicas de modelación que empleen las ecuaciones requeridas para integrar la meteorología, topografía y niveles de concentración de las partículas y/o aerosoles de interés. Para ello, es necesario contar con un sistema informático que permita esa integración de datos base y así producir la información que requerimos, así como trayectorias y/o retrotrayectorias, que nos permitan identificar o descartar el origen de la sustancia y/o aerosol. Para el presente estudio, se ha empleado el modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), el cual es ampliamente usado por la comunidad científica y aplicado a situaciones reales por diversos sectores, por ser de rápida respuesta y alta fiabilidad, lo cual es acorde para la investigación que se propone. Se hará uso de un modelo adaptado por la compañía Meteosim S.L.

Este tipo de técnicas permiten analizar el posible origen de los gases y/o aerosoles contaminantes, los riesgos para el ambiente y la salud humana, así como establecer y activar sistemas de alerta, gestión, control y mitigación de la contaminación (Instituto de Hidrología, 2012). Para el caso de Bogotá región, hasta la fecha, se ha reportado que los meses con mayor número de episodios de contaminación ambiental son febrero y marzo, seguido de enero, abril, noviembre y diciembre donde la frecuencia de inversiones térmicas es mayor y mantiene los contaminantes confinados en la capa superficial que es la más cercana al suelo (Blackman et al., 2021).

En ese sentido, se realizará un análisis de la información de calidad del aire obtenida de las autoridades ambientales competentes y la meteorología proporcionada por Meteosim S.L. en el software habilitado por la misma compañía y se centrará el análisis en los contaminantes criterio primarios, debido a que se busca por medio de retrotrayectorias individuales y conjuntas, descartar o soportar con cierto porcentaje de probabilidad la incidencia de una fuente fija en la generación de los posibles episodios de contaminación ambiental que se generen en Bogotá región durante 2021.

## 1.2. Ubicación geográfica

Para analizar el comportamiento atmosférico y el transporte de los contaminantes es relevante entender el estado topográfico del área de estudio. Colombia es un estado centralizado, que se divide en Departamentos (ej.: Córdoba) y Municipios (ej.: Chía). Como previamente se ha nombrado, Bogotá región o Bogotá y su área metropolitana comprende a la capital de Colombia en conjunto con los municipios de Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, Facatativá, Funza, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Sibaté, Soacha, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá, figura 1, ya que son las ciudades dormitorio resultado de la expansión de la capital para la última década, donde se registra una población de 9.205.125 habitantes (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) y una extensión de 3605 Km<sup>2</sup>. Se encuentra ubicada en una altiplanicie sobre la región andina de Colombia, en el centro geográfico del país a una altura promedio de 2625 msnm, sobre la vertiente de la cordillera oriental en Cundinamarca.

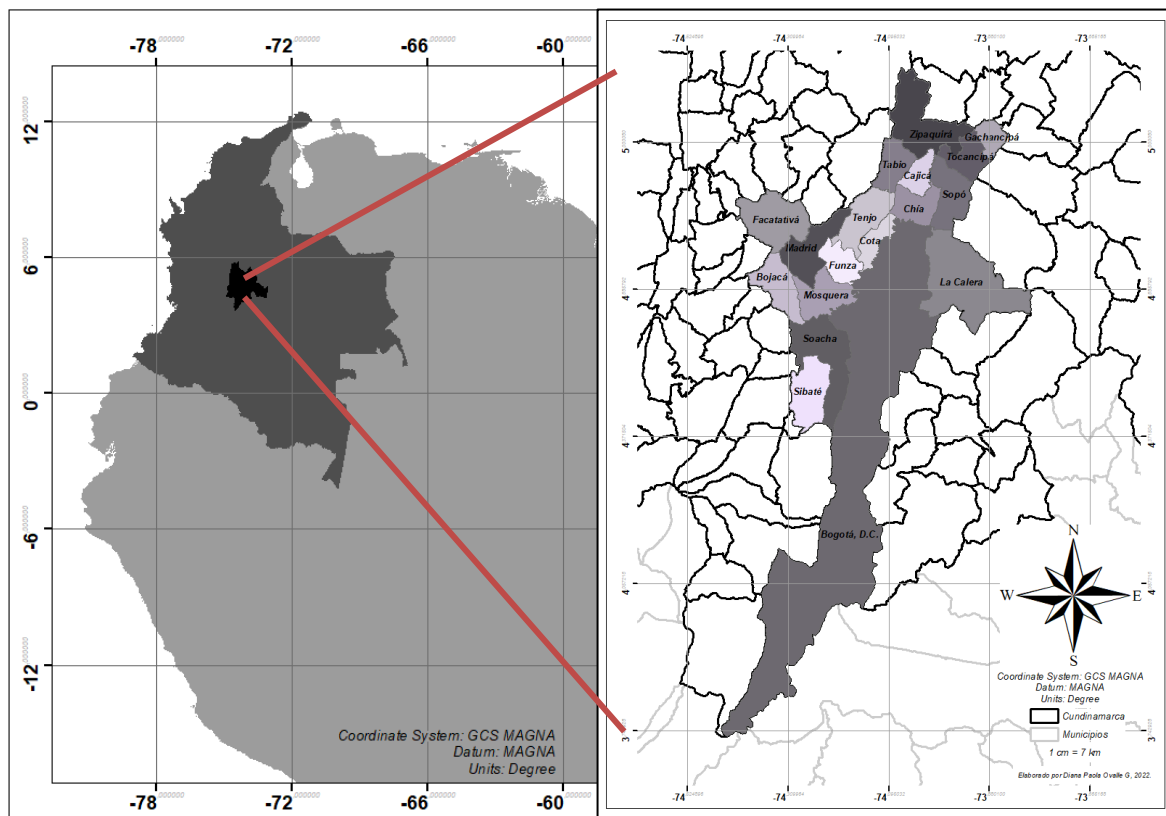


Figura 1. Ubicación de Bogotá región. Fuente propia, 2022.

Es preciso señalar que, al ser un país situado sobre el ecuador, no cuenta con estaciones, más si presenta un régimen bimodal, donde los meses de marzo, abril, mayo y luego, septiembre, octubre y noviembre son época de lluvia, así como los meses de enero, febrero, junio, julio, agosto y diciembre comprenden la época seca.

La temperatura promedio anual es de 12 – 15°C para el centro urbano, mientras que las zonas rurales alcanzan valores medios anuales de 6°C (IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, 2005).

Por otro lado, presenta una precipitación anual media cerca a los 1000 milímetros, donde el 45% de las 47 estaciones reportadas por el IDIGER (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático) se encuentran por encima de dicho promedio, teniendo los dos picos de mayor precipitación en abril y noviembre. Asimismo, es preciso señalar que aunque es uno de los centros urbanos con menor precipitación del país, en 36 de las estaciones llueve al menos la mitad del año y en el restante de estaciones llueve por lo menos 220 días al año, dato interesante para la calidad del aire de la ciudad (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, 2020).

Finalmente, con respecto al viento, es notorio que los vientos provienen en mayor proporción del oriente (Este), desde la Orinoquia, hacia el occidente con un 41% de incidencia, siendo la dirección predominante la Noreste (20%), seguida de Este (14%). La velocidad del viento es considerada normal para los vientos que se registran en el país, teniendo predominancia con un 25% los vientos de 1,5 – 2,5 m/s, mientras que alrededor del 10% de los datos registrados indican valores por encima de 4,5 m/s que ya son considerados valores significativos (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER, 2020).

### **1.3. Normatividad colombiana**

En Colombia, la normatividad parte desde la Constitución Política y los derechos fundamentales, en este caso, desde el derecho colectivo a gozar de un ambiente sano. De acuerdo con el Decreto – Ley 2811 de 1974 la contaminación del aire es uno de los factores que deterioran el ambiente, por lo cual por medio de la Resolución 2254 de 2017 se establece la norma de calidad del aire o niveles de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso en el territorio nacional, que para el caso del presente estudio, nos interesa conocer los niveles para los contaminantes primarios criterio de estudio, que se listan en la tabla 1 con los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia a partir del 1 de julio de 2018 y hasta el 31 de diciembre de 2029.

Tabla 1. Niveles máximos permisibles contaminantes criterio. Fuente: Resolución 2254 de 2017.

Contaminante	Nivel máximo permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de exposición
PM <sub>10</sub>	50	Anual
	75	24 horas
PM <sub>2,5</sub>	25	Anual
	37	24 horas
SO <sub>2</sub>	50	24 horas
	100	1 hora
CO	5000	8 horas
	35000	1 hora

Por otro lado, el tratamiento de los valores obtenidos en las estaciones de calidad del aire se realiza bajo la metodología que se establece mediante la Resolución 650 de 2010 “por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire” y la difusión a la ciudadanía de los valores reportados por las estaciones de calidad del aire se regula por medio de la Resolución 651 de 2010.

## 1.4. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo ha sido el de evaluar los efectos ambientales de los episodios de contaminación atmosférica en Bogotá región durante el año 2021 empleando el modelo HYSPLIT

### *Específicos*

- Definir episodios de contaminación atmosférica para el año 2021 a partir de los registros de las estaciones de calidad del aire suministrados por la autoridad ambiental competente y los límites máximos permitidos para cada contaminante según la legislación vigente y aplicable.
- Estimar retrotrayectorias por medio del modelo HYSPLIT para los episodios de contaminación atmosférica previamente definidos.
- Evaluar los posibles agentes causantes de las emisiones que dan lugar a los episodios de contaminación atmosférica encontrados.



## **CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS**

En este apartado se describen los recursos requeridos para el correcto desarrollo de la investigación, como información meteorológica, de calidad del aire, del software empleado, así como las metodologías desarrolladas para la selección de los episodios de contaminación ambiental por tipo de contaminante, polígonos industriales y parámetros de simulación.

### **2.1. Información meteorológica**

Para conocer cuál es el movimiento de los contaminantes de interés y, por lo tanto, plantear posibles razones de la evolución de episodios de contaminación ambiental, es preciso conocer el tiempo atmosférico de dicho momento.

La información meteorológica ha sido proporcionada por la compañía Meteosim S.L., por medio de un modelo mesoescalar WRF (Meteosim SL, 2021), alimentado con información proporcionada por teledetección y estaciones de medición a una resolución de 1 x 1 Km<sup>2</sup>, que para Cundinamarca cuenta con predicciones de hasta 72 h.

Dicho modelo ha sido calibrado y validado previamente para la región de interés en colaboración con diferentes administraciones del país (Meteosim SL).

### **2.2. Información de calidad del aire**

Para identificar los episodios a analizar es necesario contar con información de calidad del aire, por medio de mediciones válidas y suficientes de los contaminantes criterio primarios de interés. La red de calidad del aire de Colombia está bajo la dirección de las autoridades ambientales competentes para cada región, en este caso, compete a la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), asimismo, está consolidada y disponible para su consulta por medio del Subsistema de Información Sobre Calidad del Aire – SISAIRE (<http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/consultas.xhtml>).

Las estaciones pertenecientes a la red están clasificadas, entre otros parámetros, según las emisiones dominantes, es decir, teniendo en cuenta el tipo de fuente de emisora que se encuentre en el área, dividiéndose así en cuatro categorías. La estación de tráfico está condicionado principalmente por el alto flujo vehicular; de punto crítico son aquellas que se encuentran en zonas urbanas y son apoyo

fundamental para estudios epidemiológicos; de tipo industrial están influenciadas significativamente por emisiones fijas; y las de fondo son aquellas que aunque no tienen ningún tipo de influencia directa (vehicular, industrial u otro), están condicionadas por el régimen de vientos (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008), todas pueden estar en zonas urbanas, suburbanas o rurales. Las estaciones que proporcionó la SDA venían ya clasificadas y las estaciones tomadas del SISAIRE fueron clasificadas por el autor del presente documento teniendo en cuenta los lineamientos establecidos previamente y los tipos de contaminantes que se miden en cada una (Tabla 2).

Tabla 2. Contaminantes de interés según el tipo de estación. Fuente: MAVDT, 2008.

TIPO DE ÁREA	TIPO DE ESTACIÓN	CONTAMINANTES DE INTERÉS
Urbana Suburbana Rural	Tráfico	NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , CO y VOCs
	Industrial	NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , SO <sub>2</sub> y VOCs, metales pesados y Industrial contaminantes específicos.
	Punto crítico	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , CO, O <sub>3</sub> (solo para urbano)
	Fondo	NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, VOCs y O <sub>3</sub>  NH <sub>3</sub> , deposición ácida, SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> (solo para rural)

Para el caso de la SDA, los datos fueron solicitados por medio de la plataforma oficial de atención al ciudadano para el año 2021 y para todas las estaciones disponibles en Bogotá que es el área de jurisdicción correspondiente, donde entregan un total de 20 estaciones, que equivalen a la totalidad de estaciones sumadas a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), con datos horarios (Tabla 3) en unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para material particulado (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>) y en ppm y ppb para gases (SO<sub>2</sub>, CO), registrados con equipos automáticos, que cumplen con métodos la U.S. EPA CFR Título 40 Parte 53. La Secretaría comunica que los equipos se encuentran instalados al interior de la estación, en la cubierta de la cabina se tiene el sistema de toma de muestra del aire ambiente (independiente para material particulado y para gases), la cual es llevada al interior de la estación para ser analizada por cada uno de los equipos. Los valores captados son traducidos a una señal digital que es almacenada en la unidad de procesamiento del analizador y llevada un datalogger de la estación para su posterior transferencia vía internet, a la central de información de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, que, además permite la validación y procesamiento de datos, los cuales son publicados automáticamente a través del aplicativo Envista Web, al que cualquier ciudadano puede acceder a través página web



(<http://rmcab.ambientebogota.gov.co>), es decir, los datos obtenidos son válidos para su procesamiento.

Debido a que las unidades establecidas según la normatividad colombiana son microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ha sido necesario transformar los datos recibidos de gases tomando como guía el Protocolo para el Monitoreo de Seguimiento de la Calidad del Aire donde establecen todos los procedimientos, metodologías y frecuencias de estudio de los contaminantes atmosféricos, así, para la conversión se establece una presión de referencia de 760 mm Hg o 1 atm o 1013,25 hPa, y una temperatura de referencia de 25°C o 298,15K según el Protocolo (MAVDT, 2010). Por ejemplo, para el caso de la estación Bolivia, el día 01 de enero de 2021 a las 1h, se reporta una concentración de 0,293 ppb SO<sub>2</sub> que al aplicar el protocolo, queda en 0,77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Además de realizar el cambio de unidades pertinente en cada caso, también se ha realizado el cálculo de diferentes estadísticos temporales que permitan la comparación de los datos de concentración medidos con los valores límite de la normativa colombiana. De esta manera, y para el caso del análisis de 24 horas, el protocolo establece que se realiza a través del promedio aritmético de los 24 datos horarios disponibles para un día (en el caso del SO<sub>2</sub> y del material particulado).

Las estaciones para los municipios de Bogotá región (Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, Facatativá, Funza, Gachancipá, La Calera, Madrid, Mosquera, Sibaté, Soacha, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá), son operadas bajo la CAR y los valores para la investigación son obtenidos por medio del SISAIRE. La red de monitoreo cuenta con 25 estaciones de calidad del aire en estos 17 municipios, sin embargo, para el año 2021 únicamente se encontraban en funcionamiento el 60% de ellas, presentes en 8 municipios de todos los señalados, la captación y validación de la información es similar a la descrita por la Secretaría Distrital de Ambiente solo que en este caso fueron obtenidos directamente en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , por lo que no fue necesario realizar una conversión.

En la siguiente tabla se presenta la información general, que comprende nombre, ubicación, tipo de estación y el porcentaje de datos válidos durante el año, de las 35 estaciones obtenidas para estudiar episodios de contaminación atmosférica en Bogotá región.

Tabla 3. Estaciones de calidad del aire y descripción general recopiladas para el estudio. Fuente: Elaboración propia, 2022.

ORIGEN	ESTACIÓN	ABREVIATURA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO/ LOCALIDAD	COORDENADAS		DIRECCIÓN	TIPO	%DATOS VÁLIDOS 2021			
					Longitud	Latitud			PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	SO <sub>2</sub>	CO
SDA	Bolivia	BOL	Bogotá	Engativá	74°7'33,18"O	4°44'9,12"N	Avenida Calle 80 # 121-98	De fondo	100 %	100 %	98%	99 %
	Bosa	BOS		Bosa	74°12'14,6"O	4°36'20,2"N	Diagonal 73 F Sur # 78 - 44	De fondo	60%	60%	11%	58 %
	Carvajal - Sevillana	CSE		Kennedy	74°8'54,90"O	4°35'44,22"N	Autopista Sur # 63-40	Tráfico / Industrial	89%	88%	100 %	92 %
	Centro de Alto Rendimiento	CDAR		Barrios Unidos	74°5'2,28"O	4°39'30,48"N	Calle 63 # 59A-06	De fondo	100 %	99%	82%	99 %
	Ciudad Bolívar	CBV		Ciudad Bolívar	74°09'58,6"O	4°34'40,1"N	Calle 70 Sur # 56 - 11	Punto crítico	100 %	100 %	99%	98 %
	Colina	COL		Suba	74°04'10,0"O	4°44'14,1"N	Avenida Boyacá No 142 <sup>a</sup> -55	Punto crítico	85%	85%	35%	82 %
	El Jazmín	JAZ		Puente Aranda	74°06'53,8"O	4°36'30,6"N	Calle 1 G # 41 A 39	Punto crítico	98%	97%	99%	98 %
	Fontibón	FTB		Fontibón	74°8'37,75"O	4°40'41,67"N	Carrera 104 # 20 C - 31	De tráfico	92%	99%	96%	93 %
	Guaymaral	GYR		Suba	74°2'39,06"O	4°47'1,52"N	Autopista Norte # 205-59	De fondo	100 %	99%	0%	57 %
	Kennedy	KEN		Kennedy	74°9'40,80"O	4°37'30,18"N	Carrera 80 # 40-55 sur	De fondo	96%	97%	96%	83 %
	Las Ferias	LFR		Engativá	74°4'56,94"O	4°41'26,52"N	Avenida Calle 80 # 69Q-50	De tráfico	99%	99%	0%	87 %
	MinAmbiente	MAM		Santa Fe	74°4'1,13"O	4°37'31,75"N	Calle 37 # 8-40	De tráfico	100 %	100 %	0%	94 %
	Móvil 7ma	MOV		Chapinero	74°5'2,28"O	4°38'32,75"N	Carrera 7 con calle 60	De tráfico	77%	75%	0%	0%
	Móvil	MOV2		Fontibón	74°08'55,9"O	4°40'03,7"N	Carrera. 98 #16 B 50	Tráfico /	97%	98%	0%	19

	Fontibón						Industrial					%
	Puente Aranda	PTE	Puente Aranda	74°7'2,94"O	4°37'54,36"N	Calle 10 # 65-28	Industrial	84%	96%	100%	96%	
	San Cristóbal	SCR	San Cristóbal	74°5'1,73"O	4°34'21,19"N	Carrera 2 Este # 12-78 sur	De fondo	98%	98%	0%	57%	
	Suba	SUB	Suba	74° 5'36,46"O	4°45'40,49"N	Carrera 111 # 159A-61	De fondo	96%	98%	83%	94%	
	Tunal	TUN	Tunjuelito	74°7'51,44"O	4°34'34,41"N	Carrera 24 # 49-86 sur	De fondo	100%	98%	100%	99%	
	Usaquén	USQ	Usaquén	74°1'49,50"O	4°42'37,26"N	Carrera 7B Bis # 132-11	De fondo	59%	58%	97%	99%	
	Usme	USM	Usme	74°07'01,7"O	4°31'55,4"N	Carrera 11 # 65 D 50 Sur	Punto crítico	99%	0%	0%	0%	
SISAIRE	Cajicá - UMNG	UMNG	Cajicá	74° 3'11,98"O	4°55'25,97"N	km 2 vía Cajicá -Zipaquirá.	De fondo	33%	33%	53%	35%	
	Cajicá - MANAS	MNS	Cajicá	74° 0'39,59"O	4°57'28,40"N	Vía Zipaquirá vereda Chuntame	De fondo	56%	56%	13%	55%	
	Calera - urbano	CAURB	Calera	73°58'7,56"O	4°43'10,28"N	Carrera 3 # 6-10	De fondo	99%	99%	99%	98%	
	Cota - urbano	COURB	Cota	74° 6'7,46"O	4°48'35,42"N	Carrera 5 # 12-2	De fondo	8%	8%	8%	17%	
	Funza - colegio	FUCOL	Funza	74°12'56,52"O	4°43'1,19"N	Carrera 16 # 10A	De fondo	72%	72%	48%	0%	
	Funza - SISBEN	FUSIS	Funza	74°12'42,20"O	4°42'59,61"N	Calle 14 # 13 - 34	Industrial	4%	4%	4%	0%	
	Madrid - CEMODAE	CEMODAE	Madrid	74°15'58,31"O	4°43'59,87"N	CEMODAE	De fondo	76%	76%	76%	0%	
	Mosquera - DLIA	DLIA	Mosquera	74°14'11,04"O	4°43'17,04"N	Parque industrial Santo Domingo	Industrial	93%	93%	99%	0%	
	Mosquera - SENA	SENA	Mosquera	74°13'21,00"O	4°41'16,44"N	SENA Km. 7 vía Mosquera	De fondo	79%	79%	77%	0%	
	Sibaté	SAUCES	Sibaté	74°14'36,60"O	4°31'30,72"N	Calle 100	De fondo	96%	0%	100%	93%	
	Soacha - colegio	SOCOL	Soacha	74°11'43,26"O	4°34'58,06"N	Calle 38 N. 6ª 55 Este	Punto crítico	94%	94%	99%	98%	
	Soacha - Uniminuto	UNIMINUTO	Soacha	74°13'25,78"O	4°34'34,69"N	Tv. 5 #5g - 95	De fondo	73%	73%	83%	86%	
	Sopo - Briceño	BRICEÑO	Sopo	73°57'43,07"O	4°56'35,18"N	Km 34 carretera central del norte	Tráfico / Industrial	69%	84%	57%	0%	

Cundinamarca

	Tocancipá - Tibitoc	TIBITOC		Tocancipá	73°58'14,52"O	4°58'35,04"N	Planta Tibitoc	De fondo	88%	88%	76%	0%
	Zipaquirá - EFZ	EFZ		Zipaquirá	74° 0'9,72"O	5° 0'36,00"N	EMAFEZ Av. Industrial Km 1 vía Zipaquirá - Bogotá	Industrial	92%	86%	63%	0%

El sombreado amarillo que resaltan los porcentajes por tipo de contaminante en la tabla permite identificar que estaciones no cumplen con el 75% de datos válidos requerido por el protocolo del IDEAM.

### 2.2.1. Estaciones objeto de interés

Para filtrar las estaciones objeto de interés en el presente estudio, y según lo establecido en el protocolo, se debe validar que por lo menos el 75% de los valores de concentración registrados en un año, de cada uno de los parámetros, corresponden a datos válidos (MAVDT, 2010). En la Tabla 3, es posible evidenciar las estaciones que cumplen con dicho criterio por cada contaminante de interés, y que, por lo tanto, han sido empleadas según su validez por contaminante. En ese sentido, la estación Bolivia (SDA) es útil para analizar los 4 contaminantes de interés, mientras que los datos disponibles de la estación Sopo – Briceño (SISAIRE) únicamente son válidos para analizar  $PM_{2,5}$ . No todas las estaciones cumplen con lo establecido el Protocolo, 19 de las 20 estaciones proporcionadas por la SDA son admitidas en por lo menos el análisis de un contaminante, mientras que de las 15 estaciones consultadas en SISAIRE para los 17 municipios, solo se usaron el 66% de ellas, que equivalen a una cobertura del 47% sobre el total de municipios que conforman Bogotá región.

De la información de calidad del aire recopilada se puede realizar un análisis preliminar para la selección de los episodios de contaminación, con datos como valores medios, máximos y número de superaciones como se detalla en la Tabla 4, de igual manera, es preciso señalar que los recuadros que se encuentran en negro representan la falta de datos en dicho contaminante de la estación y por lo cual no se puede considerar válida para su uso en ese caso. En la Figura 2, cada mapa corresponde a cada contaminante de interés para el presente estudio, donde se gráfica únicamente las estaciones con datos válidos para el contaminante señalado. En color verde, están las estaciones que no presentan ninguna superación (cero – 0), al valor que establece la normatividad vigente bajo el límite de 24h, como es el caso de la estación DLIA que en ninguno de los contaminantes presenta superaciones. En color amarillo es posible observar todas aquellas que presentan entre 1 y 6 (incluyente) superaciones a la norma, que para el caso de  $PM_{10}$  sucede en tres estaciones de Bogotá, para  $PM_{2,5}$  se observan 5 casos en de los cuales uno se encuentra en Zipaquirá (EFZ) y el restante en Bogotá, y para  $SO_2$  se presenta en una estación de Bogotá (CSE). Finalmente, en color rojo, se discriminan todos aquellos que presentan más de 6 superaciones al límite normativo diario, en  $PM_{10}$  se encuentran seis estaciones en rojo, de las cuales cuatro están en Bogotá, una en Soacha (SOCOL) y una en Zipaquirá (EFZ) donde la estación CSE cuenta con un máximo de 120 superaciones, para  $PM_{2,5}$  se observan tres estaciones en Bogotá, donde la estación CSE nuevamente es la estación con mayor número de superaciones con 127, y una en Soacha (SOCOL); para el caso de dióxido de azufre ninguna estación queda en rojo.

Por otro lado, se observa que tan solo el 54% de las estaciones reportan datos válidos para dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), y 6 de las 35 quedan totalmente descartadas puesto que no poseen datos suficientes para considerar los datos según lo establecido en el protocolo. Asimismo, los mapas permiten identificar el tipo de estación, donde el círculo representa las estaciones de fondo, donde 13 son válidas para emplear en por lo menos un contaminante. Con un cuadrado se representan las estaciones de tipo tráfico, que son máximo cuatro y que para el caso de dióxido de azufre solo es válida FTB. Con un triángulo se representan las de tipo industrial, de las cuales solo EFZ en Zipaquirá presenta superaciones, de punto crítico, representada con una estrella, solo dos de cinco, CBV en Bogotá y SOCOL en Soacha presentan superaciones a la norma, sin embargo, ambos catalogados en nivel rojo tanto para  $\text{PM}_{10}$  como para  $\text{PM}_{2,5}$ . Las estaciones que están catalogadas como industrial y de tipo tráfico son tres, siendo CSE la que mayor presenta superaciones tanto para  $\text{PM}_{10}$  como  $\text{PM}_{2,5}$  comparada con los datos de las 35 estaciones recopiladas.

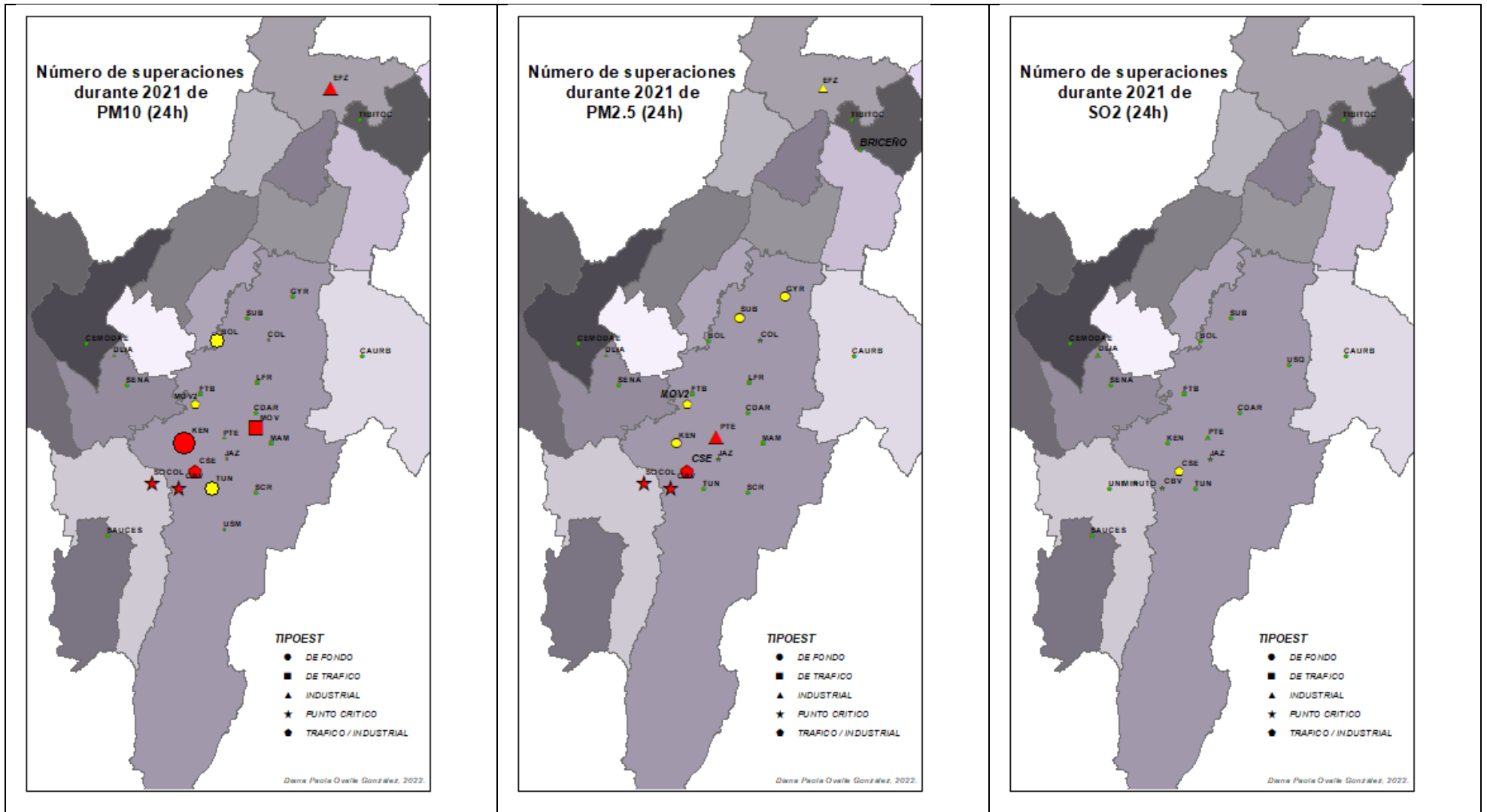


Figura 2. Número de superaciones por tipo de estación y contaminante en Bogotá región. Simbología: 1. Verde: no presenta superaciones a la norma, 2. Amarillo: presenta de 1 a 6 superaciones (tamaño mediano), 3. Rojo: Presenta más de 6 superaciones a la norma (tamaño grande). Fuente: elaboración propia, 2022.

Tabla 4. Información detallada por estaciones de número de superaciones, valores máximos, medios. Fuente: Elaboración propia, 2022.

ESTACIÓN	PM <sub>10</sub> (24h)			PM <sub>2,5</sub> (24h)			SO <sub>2</sub> (24h)		
	No. superaciones	Valor medio (µg/m <sup>3</sup> )	Valor máximo (µg/m <sup>3</sup> )	No. superaciones	Valor medio (µg/m <sup>3</sup> )	Valor máximo (µg/m <sup>3</sup> )	No. superaciones	Valor medio (µg/m <sup>3</sup> )	Valor máximo (µg/m <sup>3</sup> )
BOL	4	33	86	0	14	35	0	3	13
BOS									
CSE	120	68	130	127	35	81	6	16	59
CDAR	0	21	53	0	13	37	0	3	7
CBV	12	37	100	10	17	52	0	8	23
COL	0	18	45	0	8	24			
JAZ	0	32	71	0	17	36	0	4	11
FTB	0	26	56	0	13	31	0	3	13
GYR	0	30	72	4	15	39			
KEN	9	43	83	5	21	45	0	5	13
LFR	0	22	47	0	13	34			
MAM	0	19	46	0	12	31			
MOV	18	47	123	6	17	45			
MOV2	3	35	80						
PTE	0	32	71	11	21	48	0	4	12
SCR	0	20	51	0	12	35			
SUB	0	30	65	1	13	43	0	3	18
TUN	5	35	85	0	14	36	0	6	15
USQ							0	2	10
USM	0	35	72						
UMNG									
MNS									



CAURB	0	15	40	0	8	24	0	2	10
COURB									
FUCOL									
FUSIS									
CEMODAE	0	36	72	0	16	36	0	2	13
DLIA	0	31	71	0	12	28	0	9	41
SENA	0	23	50	0	12	28	0	3	38
SAUCES	0	18	44				0	8	28
SOCOL	64	55	181	25	19	65	0	8	43
UNIMINUTO							0	3	18
BRICEÑO				0	19	35			
TIBITOC	0	18	42	0	9	25	0	6	35
EFZ	20	37	118	1	13	38			

### 2.2.2. Posibles focos de contaminación en Bogotá región

Como previamente se mencionó, en Bogotá región coexisten 88mil industrias (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015) distribuidas por todo el territorio. Actualmente, y por disposición del Plan de Ordenamiento Territorial para Bogotá, las industrias, como tal transformación de materia prima, deben salir de Bogotá, y muchas de ellas, se han mudado a los municipios circundantes, es decir, a lo que conforma Bogotá región. Debido a esta migración, existen bastantes polígonos industriales, que son entendidos como áreas que albergan en su extensión únicamente industrias, distribuidos por todo el territorio, asimismo, el tipo de industria se encuentra mezclado, por lo cual, no es posible identificar a detalle el tipo de empresas que se encuentran en cierto sector. Es preciso aclarar que no todos los polígonos se encuentran identificados bajo algún nombre, nomenclatura o código dado por la alcaldía o por ellos mismos, de hecho, son bastante pocos los que tienen su propio nombre, como por ejemplo la zona industrial de Montevideo (MTV). Por lo anterior, el autor del presente estudio ha asignado un nombre según el municipio donde se encuentre, como por ejemplo, ZCOT es la zona industrial del Municipio de Cota, o por la cercanía de la estación meteorológica, como por ejemplo, ZFTB3, zona industrial de Fontibón sector 3. En la figura 3 es posible observar los polígonos demarcados para el presente estudio, debido a que, de acuerdo con lo analizado, son áreas representativas y las industrias identificadas posiblemente generan emisiones atmosféricas por la naturaleza de sus actividades.

Es preciso señalar en que en Bogotá todavía existen muchas industrias informales, es decir, son predios residenciales que realizan actividades como la carpintería, siderúrgica, fabricación de alimentos, entre otros, y que no se ubican en un polígono industrial y, por lo tanto, es complejo identificarlos en la ciudad.



ZEFZ1	EFZ	73°59'02,56"O	5°02'15,32"N	37	1	Industria de alimentos
ZFTB1	FTB	74°09'25,13"O	4°40'27,21"N	773	6	Zona de El Recodo, zona franca (industrial) de Fontibón
ZFTB2	FTB	74°07'40,32"O	4°40'51,29"N	1160	6	Polígono industrial frente al aeropuerto de Bogotá
ZFTB3	FTB	74°09'32,31"O	4°41'42,78"N	931	7	Ubicado cerca al puente "Puente grande"
ZFTB4	FTB	74°09'52,04"O	4°41'14,25"N	251	2	Ubicado cerca al puente "Puente grande", sector 2
ZFTB5	FTB	74°06'58,59"O	4°41'15,358"N	1092	5	Zonas de conecta y Álamos, Engativá
ZMDRD	DLIA	74°14'20,86"O	4°43'07,41"N	1507	7	Zona industrial del municipio de Madrid
ZMSQR	SENA	74°12'01,44"O	4°42'04,69"N	764	6	Zona industrial del municipio de Mosquera
ZMTV	PTE	74°07'08,04"O	4°38'44,00"N	1765	5	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZPTE1	PTE	74°06'54,94"O	4°37'51,08"N	521	3	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZPTE2	PTE	74°06'32,16"O	4°38'03,89"N	1734	5	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZPTE3	PTE	74°05'51,20"O	4°37'00,80"N	3071	7	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZSO1	SOCOL	74°10'42,84"O	4°35'43,83"N	111	2	Zona industrial de Cazuca, Soacha
ZSO2	UNIMINUTO	74°14'11,95"O	4°33'38,61"N	221	3	Zona industrial de cerámica, agregados y otros
ZSO3	UNIMINUTO	74°13'37,70"O	4°33'54,71"N	194	2	Industria variada (manufactura, alimentos)
ZSO3	SAUCE	74°15'11,49"O	4°32'24,61"N	714	4	Industria siderúrgica
ZSO4	UNIMINUTO	74°15'00,86"O	4°34'41,49"N	25	0.7	Industria de cementos y agregados
ZSO5	UNIMINUTO	74°14'41,45"O	4°34'53,98"N	46	1	Industria de municiones
ZSO6	UNIMINUTO	74°16'16,10"O	4°35'16,14"N	135	2	Industria de vidrios
ZTNJO	BOL	74°10'27,09"O	4°46'11,30"N	7761	18	Zona industrial del municipio de Tenjo

### 2.3. Modelo HYSPLIT

HYSPLIT es un modelo desarrollado en el laboratorio de recursos atmosféricos de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) que simula el transporte por dispersión y posible transformación química para predecir el recorrido y la posible deposición de un contaminante en situaciones de emergencia de manera rápida y accesible (Castagna et al., 2021).

El modelo es aplicado tanto para identificar su origen o su destino, por medio de retrotrayectorias y/o trayectorias, respectivamente. Sin embargo, en la actualidad, se aplica ampliamente por la comunidad científica e instituciones para describir procesos de dispersión de material particulado, gases, aerosoles, compuestos traza, entre otros, que son emitidos por fuentes puntuales, sea por actividades humanas o naturales, o descartar posibles orígenes de un episodio de contaminación (Wang et al., 2010). Mientras que la trayectoria permite identificar hacia donde se desplazará

una posible emisión en función del campo de vientos (Zhao et al., 2019), las retrotrayectorias, ayudan a analizar cuál es el origen de la contaminación, identificando qué zonas son posibles descartar como foco de contaminación (Stein et al., 2015).

Una trayectoria/ retrotrayectoria establece una relación de fuente y receptor, donde el resultado es un recorrido, de cierta distancia y altitud del contaminante simulado. Sin embargo, simular una única trayectoria no es suficiente para representar adecuadamente el transporte del contaminante, debido a que no permite evidenciar el crecimiento y comportamiento de la nube de la sustancia (Alarcón et al., 2022) e identificar rutas de transporte de los contaminantes de interés.

Las retrotrayectorias en conjunto son la simulación de una retrotrayectoria con todas sus componentes en el plano tridimensional, obteniendo así 27 resultados del mismo recorrido, si el total de ellas presenta direcciones similares, existe una alta probabilidad que el análisis de la retrotrayectoria individual sea certero, en ese sentido, es preciso señalar, que la retrotrayectoria en conjunto expresa una medida de la incertidumbre del análisis más no del modelo en general.

Un aspecto relevante para nombrar del modelo aplicado en el presente estudio es que toma en cuenta tanto la dispersión horizontal como vertical de los datos meteorológicos de entrada (Su et al., 2015), asimismo, la meteorología proporcionada por Meteosim S.L. cuenta con una resolución de 1 x 1 Km<sup>2</sup> que permitirá identificar con precisión el origen y/o destino del recorrido que realiza el contaminante criterio.

Las simulaciones se han realizado bajo los siguientes parámetros:

Altura del análisis de la retrotrayectoria: 2 m

Número de horas a simular: 3 – 6 h

Número de simulaciones: 3, hora de interés  $\pm$  2h.

Resolución temporal: 1h

En la ficha que se detalla en el capítulo 2.4.3. es posible observar para cada situación, los valores establecidos para cada parámetro según las necesidades evidenciadas.

## **2.4. Metodología de análisis**

En el siguiente apartado se describe la metodología para descartar y seleccionar episodios que superan la norma nacional según el contaminante de interés para su posterior análisis en el software y así identificar, de acuerdo con el régimen de

vientos, el posible recorrido que pudo haber hecho y así, evaluar ambientalmente cada situación.

#### 2.4.1. Selección de los episodios de contaminación

Previamente en el capítulo 2.2.1. se analizan los datos recopilados de las estaciones de interés para Bogotá región durante 2021, en ese primer filtro se seleccionan cuáles podrían ser las estaciones que presenten episodios de contaminación ambiental atmosférica, que, en la tabla 6, se detalla cuáles son y de que fecha a qué fecha se supera el límite establecido en la norma por cada contaminante. Para el presente estudio, se ha definido que un episodio de contaminación ambiental debe superar el límite diario en por lo menos 3 días consecutivos. Con el objeto de analizar las superaciones a la normatividad colombiana del contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los episodios de contaminación atmosférica se establecen a nivel horario (únicamente para este contaminante) puesto que no se encuentran registros de más de 8 horas consecutivas, en ninguna estación.

Tabla 6. Episodios de contaminación atmosférica en Bogotá región, primer filtro. Fuente: Elaboración propia, 2022.

PM10						
No.	ESTACIÓN	DESDE	HASTA	No. días	VALOR MÁX. REPORTAD O (µg/m <sup>3</sup> )	RÉGIMEN CLIMÁTICO
1	CSE	13/01/2021	15/01/2021	3	94	ÉPOCA SECA
2	CSE	18/01/2021	22/01/2021	5	104	
3	CSE	27/01/2021	30/01/2021	4	95	
4	CSE	15/02/2021	17/02/2021	3	90	
5	CSE	3/03/2021	6/03/2021	4	98	ÉPOCA DE LLUVIAS
6	CSE	23/03/2021	27/03/2021	5	118	
7	SOCOL	19/04/2021	23/04/2021	5	160	
8	CSE	20/04/2021	23/04/2021	4	96	
9	EFZ	20/04/2021	24/04/2021	5	114	ÉPOCA SECA
10	CSE	2/06/2021	4/06/2021	3	88	
11	CSE	23/06/2021	26/06/2021	4	109	
12	SOCOL	24/06/2021	26/06/2021	3	119	
13	SOCOL	1/07/2021	14/07/2021	14	169	
14	CSE	14/07/2021	16/07/2021	3	84	
15	CSE	24/08/2021	27/08/2021	4	93	ÉPOCA DE LLUVIAS
16	CSE	30/08/2021	4/09/2021	6	93	
17	SOCOL	2/09/2021	4/09/2021	3	123	
18	CSE	13/09/2021	15/09/2021	3	92	
19	CSE	27/09/2021	29/09/2021	3	91	
20	SOCOL	1/10/2021	3/10/2021	3	84	
21	CSE	4/10/2021	6/10/2021	3	93	

22	CSE	12/10/2021	15/10/2021	4	110	
23	CSE	27/10/2021	29/10/2021	3	99	
24	CSE	4/11/2021	6/11/2021	3	102	
25	CSE	12/11/2021	14/11/2021	3	87	
26	CSE	18/11/2021	20/11/2021	3	109	
27	CSE	29/11/2021	4/12/2021	6	111	
28	SOCOL	1/12/2021	9/12/2021	9	135	ÉPOCA SECA
29	SOCOL	14/12/2021	17/12/2021	4	181	
PM <sub>2,5</sub>						
No.	ESTACIÓN	DESDE	HASTA	No. días	VALOR MÁX. REPORTADO (µg/m <sup>3</sup> )	RÉGIMEN CLIMÁTICO
1	CSE	18/01/2021	22/01/2021	5	53	
2	CSE	27/01/2021	30/01/2021	4	81	ÉPOCA SECA
3	CSE	2/02/2021	6/02/2021	5	42	
4	CSE	15/02/2021	17/02/2021	3	45	
5	CSE	3/03/2021	6/03/2021	4	52	
6	MOV	4/03/2021	6/03/2021	3	45	
7	PTE	4/03/2021	6/03/2021	3	48	
8	CSE	17/03/2021	31/03/2021	15	67	
9	PTE	23/03/2021	25/03/2021	3	44	
10	SOCOL	23/03/2021	26/03/2021	4	62	
11	SOCOL	20/04/2021	22/04/2021	3	51	ÉPOCA DE LLUVIAS
12	CSE	21/04/2021	23/04/2021	3	47	
13	CSE	2/09/2021	9/09/2021	8	44	
14	CSE	13/09/2021	15/09/2021	3	43	
15	CSE	20/09/2021	24/09/2021	5	45	
16	CSE	27/09/2021	6/10/2021	10	57	
17	CSE	11/10/2021	16/10/2021	6	55	
18	CSE	19/10/2021	29/10/2021	11	60	
19	CSE	4/11/2021	6/11/2021	3	51	
20	CSE	12/11/2021	4/12/2021	23	64	ÉPOCA SECA
21	SOCOL	1/12/2021	3/12/2021	3	53	
SO <sub>2</sub>						
No.	ESTACIÓN	DESDE	HASTA	No. HORAS	VALOR MÁX. REPORTADO (µg/m <sup>3</sup> )	RÉGIMEN CLIMÁTICO
1	CSE	20/01/2021 01:00	20/01/2021 03:00	3	165	ÉPOCA SECA
2	CSE	11/05/2021 18:00	11/05/2021 21:00	4	142	
3	CSE	15/05/2021 13:00	15/05/2021 15:00	3	110	ÉPOCA DE LLUVIAS
4	CSE	15/05/2021 21:00	15/05/2021 23:00	3	143	
5	CSE	17/05/2021 21:00	17/05/2021 23:00	3	210	
6	CSE	20/05/2021 19:00	20/05/2021 21:00	3	178	
7	CSE	01/06/2021 20:00	01/06/2021 22:00	3	130	
8	CSE	02/07/2021 23:00	03/07/2021 01:00	3	355	ÉPOCA SECA
9	CSE	09/07/2021 24:00	10/07/2021 03:00	4	162	

10	CSE	10/07/2021 21:00	10/07/2021 23:00	3	145	ÉPOCA DE LLUVIAS
11	CSE	15/07/2021 19:00	16/07/2021 02:00	8	140	
12	CSE	02/09/2021 02:00	02/09/2021 05:00	4	176	

Con la información recopilada en la anterior tabla, se ha seleccionado el episodio más largo por cada estación y por régimen (si aplica) para evaluar el avance horario de los niveles de contaminación del día que registre el pico más alto y así, poder establecer si los niveles responden a fuentes fijas o móviles.

### **PM<sub>10</sub>**

Para el caso de PM<sub>10</sub> se encuentran tres estaciones, una en Bogotá (CSE) y dos en región (SOCOL y EFZ) que presentan superaciones a la norma durante mínimo tres días consecutivos en 29 ocasiones que suma un total de 125 días con valores en promedio de 108 µg/m<sup>3</sup>. A continuación, y por cada estación, se presentan los días seleccionados, tanto para época de lluvias como época seca (si aplica) para definir si el comportamiento responde a una fuente fija, que es el objeto del presente estudio.

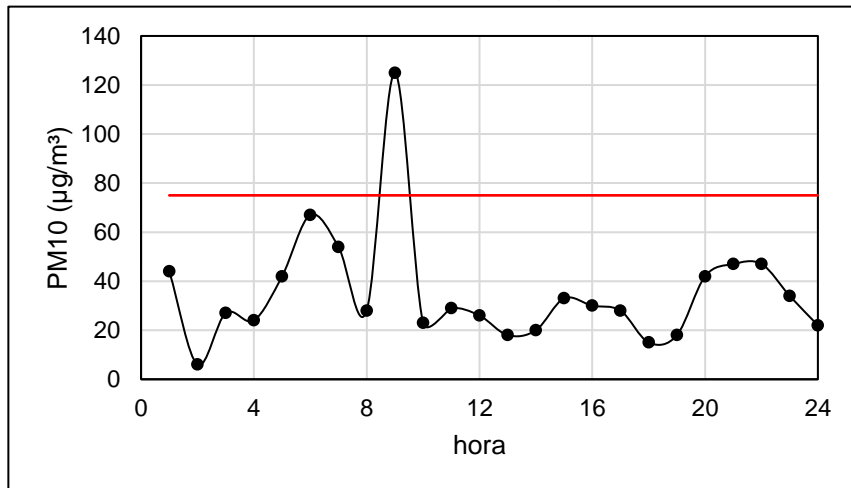
### CSE

La estación Carvajal – Sevillana se encuentra sobre la Autopista Sur, una de las vías con mayor flujo vehicular de Bogotá puesto que es la salida principal de la ciudad hacia los municipios colindantes por el lado suroccidental, como Soacha y Sibaté, además, se encuentra en una zona que es considerada industrial a pesar que desde hace una década se está fomentando el abandono de estas para su traslado a áreas alejadas de la zona urbana de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial, por ello, se define como una estación de tipo Tráfico/ Industrial.

Durante el régimen de época seca, se registra un episodio de contaminación atmosférica desde el 30 de agosto hasta el 04 de septiembre, seis días, que durante el 31 de agosto a las 9h se registra un valor de 125 µg/m<sup>3</sup>, y como se evidencia Figura 4.a, los niveles en el transcurso del día son bastante variables y no siguen un patrón específico, asimismo sucede con el episodio seleccionado durante la época de lluvia graficado en la figura 4.b, que sucede desde el 29 de noviembre hasta el 4 de diciembre, un total de 6 días de altos niveles de PM<sub>10</sub>, donde el máximo se registra el día 01 de diciembre registrando un valor máximo de 109 µg/m<sup>3</sup>. De acuerdo con lo observado, se puede concluir que la estación responde más a un comportamiento de tipo industrial (aunque influenciado también por la componente vehicular), por lo cual la estación es objeto de interés para simular los episodios en el software para identificar cual posiblemente será la fuente de estos picos de concentración.



a. Concentración de PM10 para el día 31 de agosto de 2021 estación CSE.



b. Concentración de PM10 para el día 01 de diciembre de 2021 estación CSE.

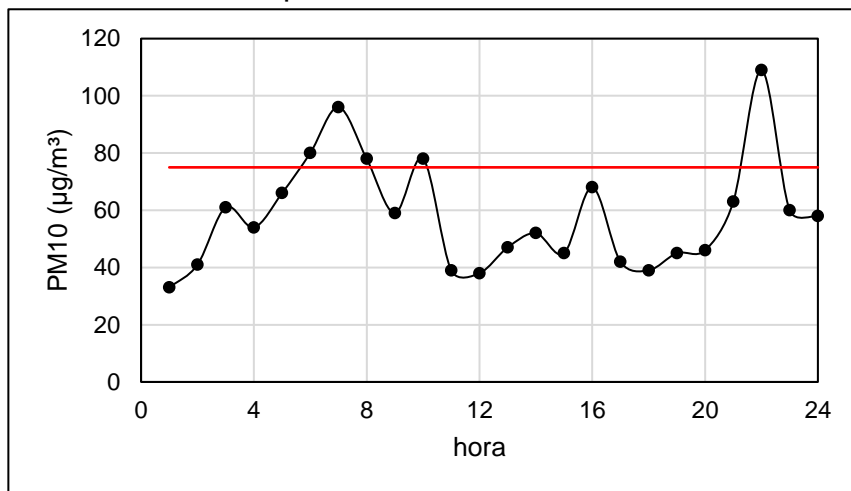


Figura 4. Análisis horario del comportamiento de los niveles PM10, estación CSE. Fuente: Elaboración propia, 2022.

## EFZ

La estación EFZ se encuentra en el Municipio de Zipaquirá, a las afueras de la zona urbana, en un polígono industrial, que integra industrias de los sectores manufactura, química y agropecuario. Para PM<sub>10</sub> reporta un único episodio de contaminación en época de lluvias que inició el 20 de abril de 2021 y duró hasta el 24 del mismo mes, con un valor máximo de 428 µg/m<sup>3</sup> el día 23 a las 20 horas, sin embargo, como se observa en la figura 5, 14 horas del día se encuentra por encima del nivel permisible, asimismo, en los datos recopilados a nivel horario, se observan registros de por encima de 200 µg/m<sup>3</sup> durante los cinco días del episodio, valores que superan la norma en más de un 100%. La estación tampoco presenta influencia de fuentes móviles, por lo cual es ideal para la presente investigación.

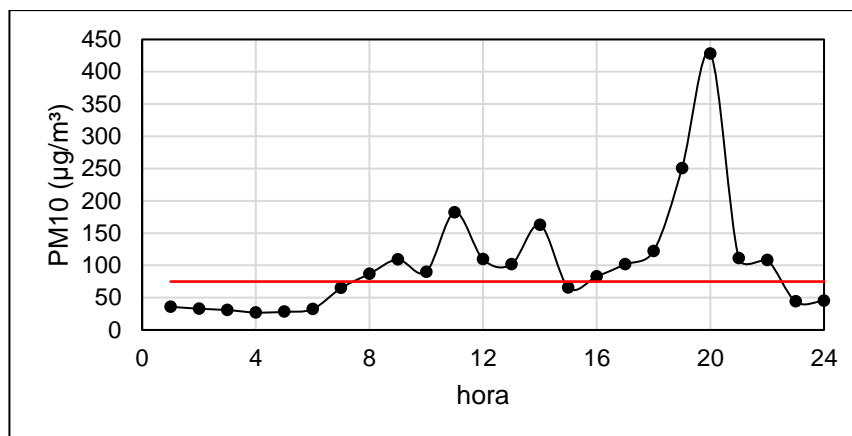
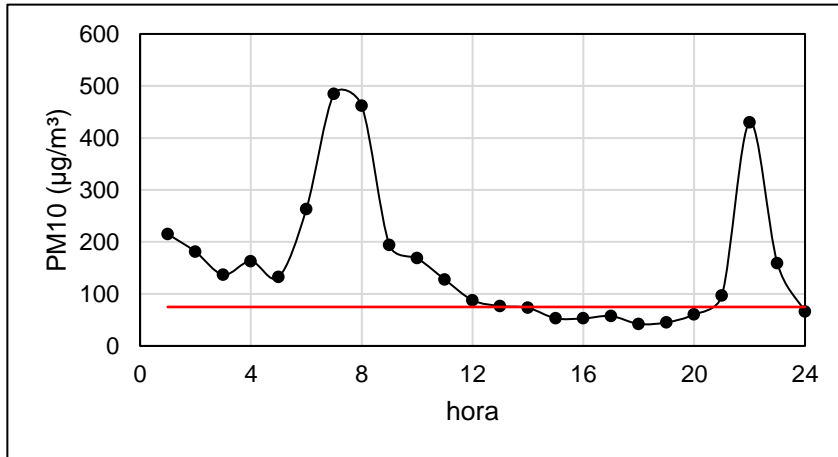


Figura 5. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM10, estación EFZ. Fuente: Elaboración propia, 2022

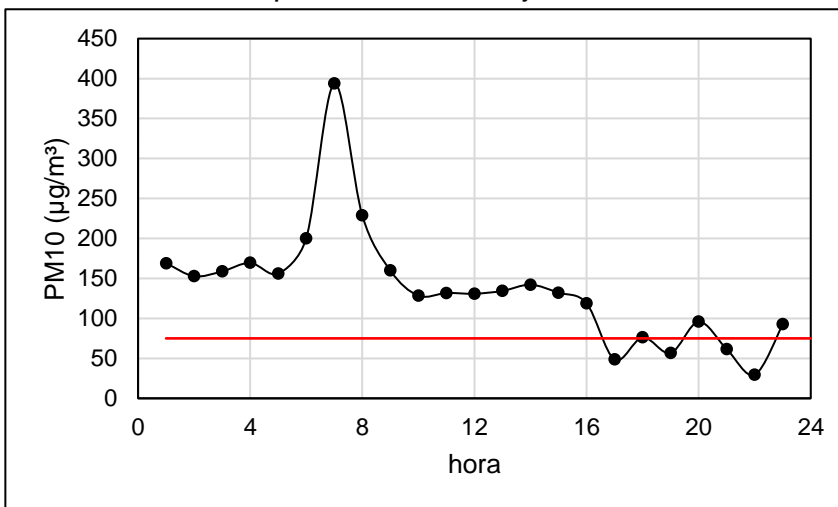
### SOCOL

Es una de las cuatro estaciones pertenecientes al municipio de Soacha, se encuentra en la zona del colegio Liceo Mayor de Soacha que recibe más de mil estudiantes al día y por ello se establece como una estación de punto crítico. El primer episodio seleccionado para su análisis dura desde el 19 de abril hasta el 23 de abril de 2021 que comprende la época de lluvias. En la figura 6.a se observa la concentración para el contaminante durante el día 22 que es el que presenta el pico más alto a las 7h con 484  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , nivel que supera más de 6 veces la normatividad vigente. Por otro lado, en época seca, se registra un periodo de baja calidad del aire desde el 01 de julio hasta el 14 de julio del 2021, donde se registra un promedio de PM10 de 132  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con registros por encima de las 100 unidades todos los días del episodio y por encima de 200 durante 5 de los 14 días. El día 14 de julio es donde se presenta el pico más alto, se registra un valor de 394  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 7h tal como se observa en la figura 6.b., de acuerdo a lo que se observa, probablemente juntos episodios son ocasionados por tráfico vehicular debido a los dos picos de concentración, a las 7 y a las 22 horas, que se ven tan marcados en la gráfica, por otro lado, se analizan los días del episodio que dura 14 días durante julio, y se evidencia que la mayoría de días no presentan un comportamiento homogéneo en casi ninguno de sus días, por lo anterior, se descarta para el presente estudio el primer episodio (abril) de la estación SOCOL y se deja para evaluación el que sucede en época seca, durante el día 12 de julio, figura 6.c., que demuestra el comportamiento variable de la concentración del contaminante en el transcurso del día. El registro de concentración horaria en la estación, y con los días que es posible observar en la Figura 6, demuestra su influencia tanto por la industria como por el tráfico.

a. Concentración de PM10 para el día 22 de abril de 2021 estación SOCOL.



b. Concentración de PM10 para el día 14 de julio de 2021 estación SOCOL.



c. Concentración de PM10 para el día 12 de julio de 2021 estación SOCOL.

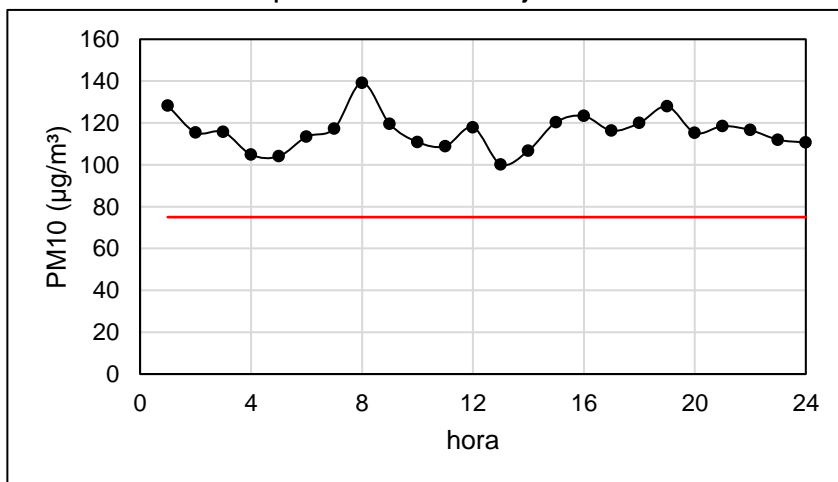


Figura 6. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM10, estación SOCOL. Fuente: Elaboración propia, 2022

Por lo cual, para PM<sub>10</sub> se dejan para su evaluación en HYSPLIT los casos que se mencionan a continuación:

Tabla 7. Eventos seleccionados para modelación en HYSPLIT, contaminante: PM<sub>10</sub>. Fuente: Elaboración propia, 2022

ESTACIÓN	ÉPOCA DE LLUVIA			ÉPOCA SECA		
	Fecha	Horario	Concentración (µg/m³)	Fecha	Horario	Concentración (µg/m³)
CSE	31/08/2021	9h	125 µg/m³	01/12/2021	22h	109 µg/m³
EFZ	23/04/2021	20h	428 µg/m³	-	-	-
SOCOL	12/07/2021	12h	118 µg/m³	-	-	-

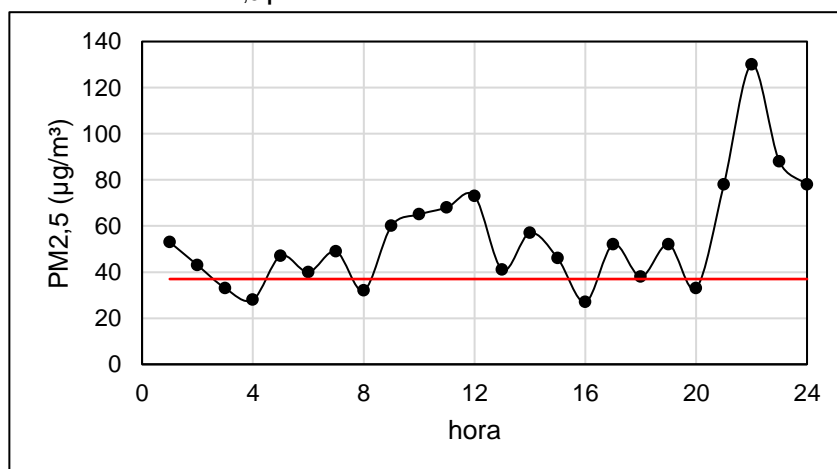
### PM<sub>2,5</sub>

Se encuentran 21 situaciones en que 4 de las 35 estaciones presentan episodios de contaminación ambiental con un valor promedio diario de 52 µg/m³ durante los 127 días que suman en total. A continuación, se describe por estación cada episodio seleccionado con el mayor pico registrado diario tanto para época de lluvias como seca.

### CSE

Como se esperaba, los niveles de PM<sub>2,5</sub> para la estación Carvajal – Sevillana son altos, presentándose 15 episodios de contaminación atmosférica a lo largo del año, el periodo más largo durante la época de lluvias sucede desde el 17 hasta el 31 de marzo siendo 15 días que registran una concentración máxima diaria de 67 µg/m³ y una concentración máxima horaria de 130 µg/m³ el 24 de marzo a las 22h como es posible observar en la figura 7.a. Asimismo, en la parte b de la misma figura se observa el periodo más largo registrado durante todo el año para los tres contaminantes de interés siendo de 23 días, desde el 12 de noviembre hasta el 4 de diciembre, donde el día 19 de noviembre registra el valor horario más alto con 182 microgramos por cada metro cúbico. Sin embargo, como ambos días resultan siendo parte del régimen de lluvias, se seleccionará para su análisis en el software el día 19 de noviembre de 2021 puesto que el valor registrado supera al de marzo.

a. Concentración de PM<sub>2,5</sub> para el día 24 de marzo de 2021 estación CSE.



b. Concentración de PM<sub>2,5</sub> para el día 19 de noviembre de 2021 estación CSE.

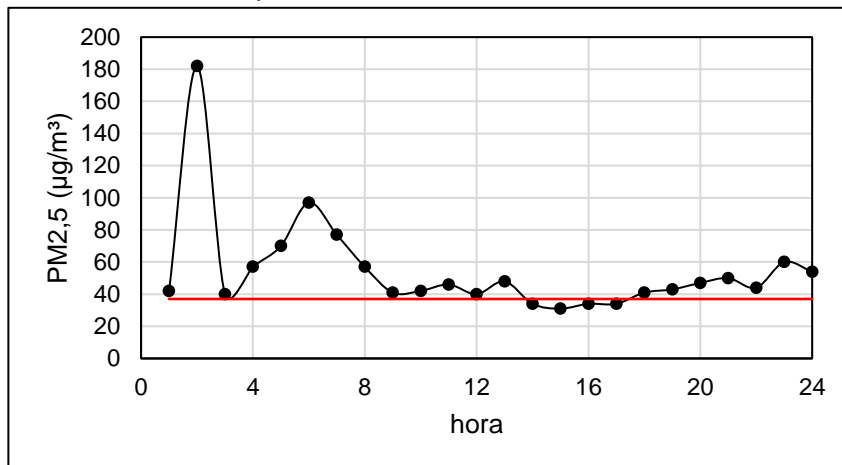


Figura 7. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM<sub>2,5</sub>, estación CSE. Fuente: Elaboración propia, 2022

### MOV

La estación se encuentra ubicada en Chapinero, sector nororiente de Bogotá de tipo tráfico. Solo se presenta un episodio de contaminación atmosférica que comprende desde el 04 hasta el 06 de marzo, presentándose el pico máximo horario el día 05 del mes a las 18h como se gráfica en la figura 8. Como era de esperarse el comportamiento del contaminante se debe a fuentes móviles, es decir, flujo vehicular. Por otro lado, desde las 9h hasta antes de las 16h no se registran datos.

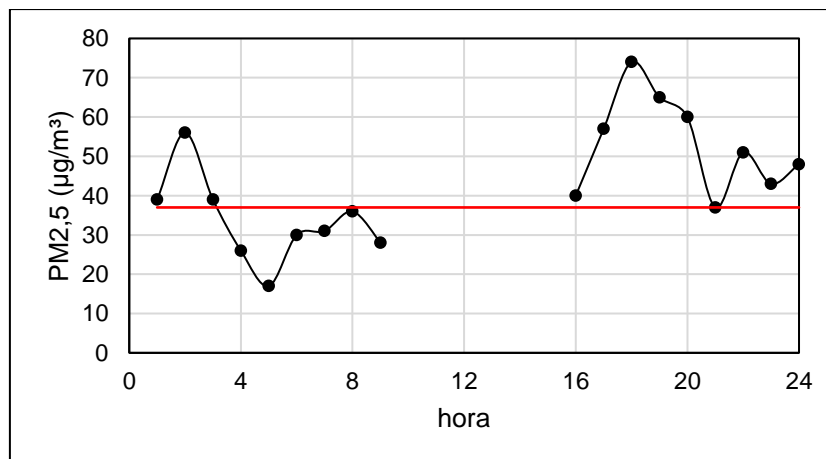


Figura 8. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM<sub>2,5</sub>, estación MOV. Fuente: Elaboración propia, 2022

### PTE

En la Estación Puente Aranda, ubicada en casi el centro de la ciudad se registró un episodio de contaminación de PM<sub>2,5</sub> durante los mismos días que la estación MOV, solo que, en este caso, el día 06 de marzo es el que presenta mayor registro con un valor de 77 µg/m<sup>3</sup> a las 8h del día. Se observa que es muy variable la concentración

a lo largo del día y que los picos presentan irregularidades, no solo para el día 06 sino para todos los días que presentaron superaciones a la norma, por lo cual es probable que la estación este influenciada por la industria.

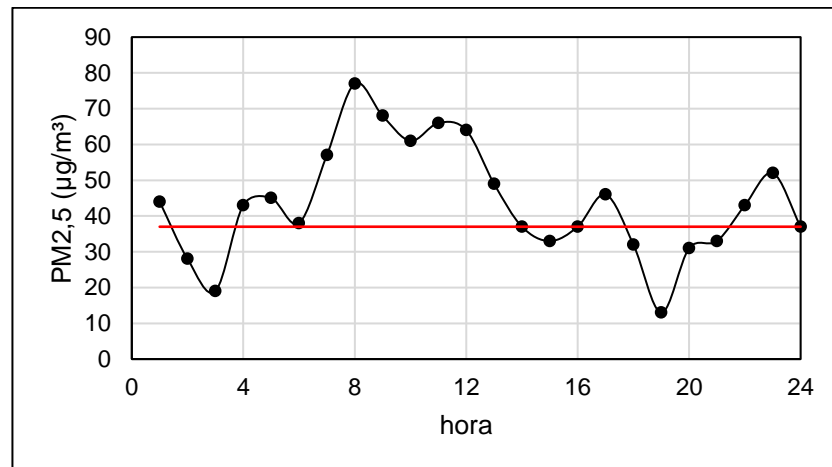
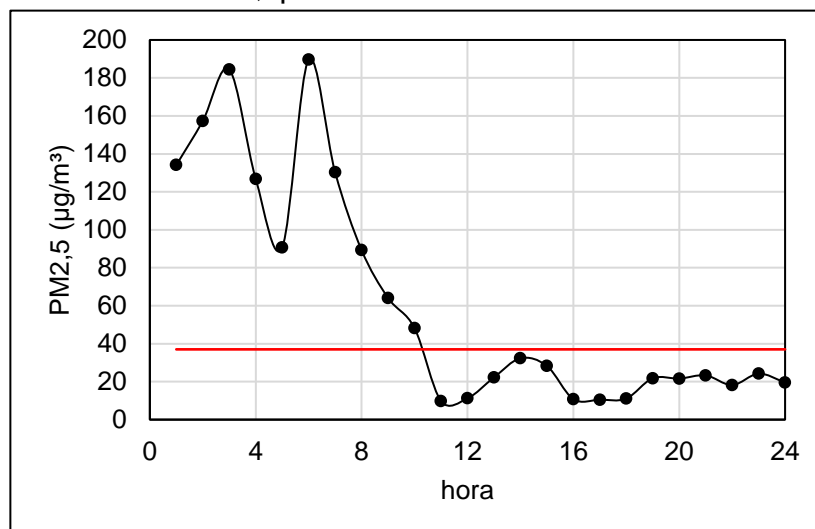


Figura 9. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM<sub>2,5</sub>, estación PTE. Fuente: Elaboración propia, 2022

### SOCOL

La estación presenta 3 episodios de contaminación atmosférica durante el 2021. La primera, durante la época de lluvias, sucede desde el 23 de marzo hasta el 26 del mismo mes, siendo el día 26 a las 6h se registra el pico con un registro de 190 µg/m<sup>3</sup> como se observa en la figura 10.a, y sucediendo durante el mismo periodo que el episodio registrado en la estación CSE, mientras que en la figura 10.b se observa que sucede desde el 01 de diciembre y dura 3 días, siendo ese primer día el que tiene un registro de 147 µg/m<sup>3</sup> a las 7h. En ambos periodos es posible evidenciar que, en las primeras horas del día, aproximadamente hasta las 9h se registran picos y superaciones constantes al valor medio diario (37 µg/m<sup>3</sup>), sin embargo, los picos evidenciados son bastante irregulares y no es posible identificar claramente el patrón de tráfico en la estación.

a. Concentración de PM<sub>2,5</sub> para el día 26 de marzo de 2021 estación SOCOL.



b. Concentración de PM<sub>2,5</sub> para el día 01 de diciembre de 2021 estación SOCOL.

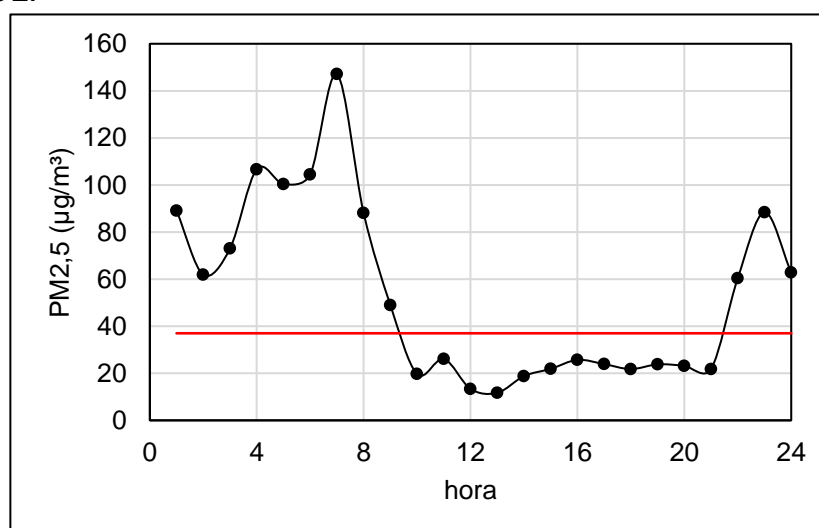


Figura 10. Análisis horario del comportamiento de los niveles de PM<sub>2,5</sub>, estación SOCOL. Fuente: Elaboración propia, 2022.

En general, se evidencia que los episodios de contaminación atmosférica suceden al mismo tiempo en estaciones cercanas como lo son SOCOL y CSE, o PTE con MOV. Asimismo, los episodios seleccionados para su análisis con HYSPLIT son:

Tabla 8. Eventos seleccionados para modelación en HYSPLIT, contaminante: PM<sub>2,5</sub>. Fuente: Elaboración propia, 2022.

ESTACIÓN	ÉPOCA DE LLUVIA			ÉPOCA SECA		
	Fecha	Duración	Concentración			
CSE	19/11/2021	2h	182 µg/m <sup>3</sup>	-	-	-
PTE	06/03/2021	8h	77 µg/m <sup>3</sup>	-	-	-
SOCOL	26/03/2021	6h	190 µg/m <sup>3</sup>	-	-	-

## SO<sub>2</sub>

Finalmente, para la selección de episodios de contaminación atmosférica por dióxido de sulfuro se tiene como parámetro registro mínimo de 3 horas consecutivas debido a que 4 de los 12 episodios registrados son mayores de dicho número de horas y solo uno alcanza las 8 horas consecutivas por encima del nivel horario de la norma.

Por otro lado, todos los episodios de contaminación registrados para este contaminante provienen de la estación CSE, que, registra su máximo nivel horario con durante julio, desde el 15 a las 19h hasta el 16 del mismo mes a las 2h.

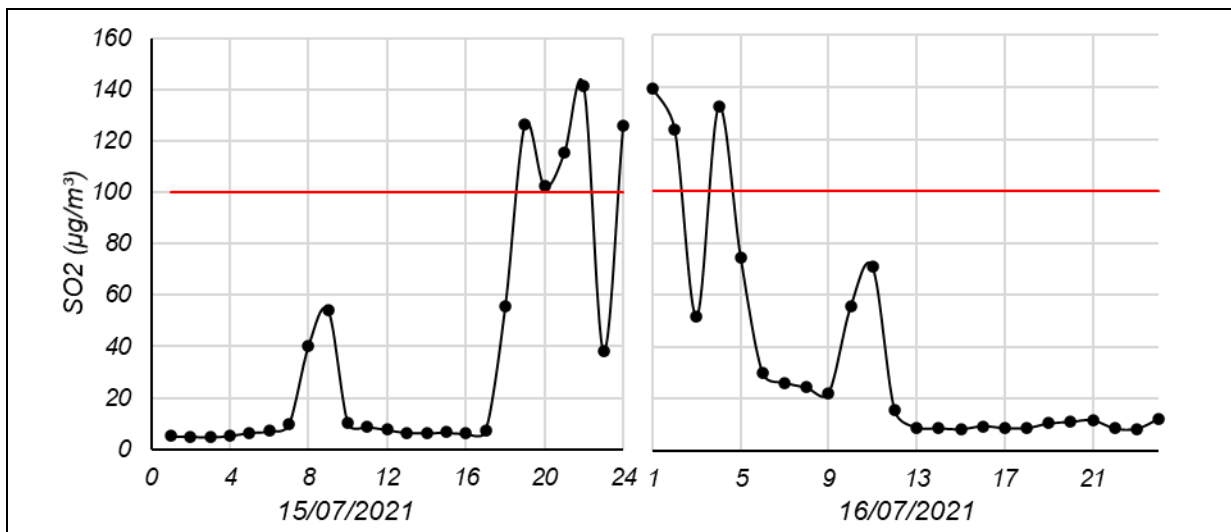


Figura 11. Análisis horario del comportamiento de los niveles de SO<sub>2</sub>, estación CSE. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Como se observa en la figura 11, durante las horas de la noche – madrugada, se observan varios picos del contaminante, por lo anterior, para la simulación se tomará el observado a la primera hora del día 16 de julio que registra un valor de 140 µg/m<sup>3</sup>.

### 2.4.2. Análisis de los resultados

Para el análisis de los resultados de la simulación de cada fecha seleccionada, se establece una ficha normalizada para las retro trayectorias, donde se identificarán los datos básicos de la estación y del evento, mapas de cada simulación realizada y finalmente se evaluará ambientalmente el episodio, sus posibles causas, descarte de posibles orígenes o establecer, con cierto grado de probabilidad, si la contaminación pudo llegar desde alguno de los polígonos industriales previamente definidos.

En el caso del estudio de las retro trayectorias, y para establecer qué tan probable es que cierto polígono haya influenciado el evento de contaminación, se toma como base el recorrido de cada una de las 3 retro trayectorias simuladas para cada evento,



donde dependiendo la cercanía del recorrido de una de la otra, se define si presenta un alta, media, baja o nula probabilidad tal como se observa en la tabla 9.

Tabla 9. Definición de la probabilidad para las retrotrayectorias. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Probabilidad	Simbología	Definición
Alta		Las tres retrotrayectorias simuladas pasan por encima del mismo polígono industrial a alturas similares y menores a 30m.
Media		Dos de las tres retrotrayectorias simuladas pasan por encima del mismo polígono industrial a alturas similares y menores a 30m.
Baja		Una de las tres retrotrayectorias simuladas pasan por encima del mismo polígono industrial a alturas similares y menores a 30m.
Nula		Ninguna de las tres retrotrayectorias simuladas pasan por encima de algún polígono industrial y menores a 30m.

En la tabla 10 se establece el formato para el análisis de las retrotrayectorias por evento que se divide en 3 secciones, donde la primera se nombra “Datos básicos” puesto que detalla cual es la estación y evento de evaluación, luego las simulaciones, que serán tres por cada evento, y será una antes, otra durante y por ultimo después del evento para evidenciar el régimen de vientos durante estos tres espacios temporales, en el mapa resultante se grafican las simulaciones generadas y los polígonos industriales. Finalmente, en el espacio de análisis del evento se debe detallar la evaluación ambiental y definir la probabilidad final del origen, así como, si es el caso, descartar orígenes industriales de la contaminación.

Seguido, se evaluará la variabilidad de los resultados obtenidos por medio de un análisis por conjunto de retrotrayectorias para la hora durante evento, bajo los mismos parámetros generales establecidos para las 3 retrotrayectorias planteadas previamente.

Tabla 10. Formato para el análisis de retrotrayectorias. Fuente: Elaboración propia, 2022.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS				ID	Rxx
<b>Datos básicos</b>					
Contaminante			Ubicación		Fecha
Estación			Tipo		hora
Coordenadas geográficas	N		Altura referencia		
	O		Resolución temporal		
Máximo horario registrado		$\mu\text{g}/\text{m}^3$			
<b>Simulación 1: 1 hora antes del evento</b>		<b>Simulación 2: durante el evento</b>		<b>Simulación 3: 1 hora después del evento</b>	
hora		hora		hora	
horas simuladas		horas simuladas		horas simuladas	
<b>Mapa</b>				<b>Polígono en área</b>	<b>Intersección con Retrotray</b>
				prob*	
<b>Análisis del evento</b>					

## **CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En este capítulo se describen y evalúan los resultados de los eventos finalmente seleccionados en el capítulo 2.4.3, y los eventos desde los polígonos industriales de interés que son simulados en el software proporcionado por Meteosim SL bajo el modelo HYSPLIT.

### **3.1. Retrotrayectorias**

Se han simulado en total 24 retrotrayectorias para los 8 eventos seleccionados en Bogotá región durante el 2021 bajo los parámetros establecidos previamente y los tres contaminantes de interés.

Una vez obtenidos los resultados de las retrotrayectorias, se ha simulado una retrotrayectoria en conjunto por cada situación a la hora del evento para evidenciar la estabilidad del campo de vientos y así mismo, poder observar la variabilidad del modelo para cada evento.

#### **3.1.1. PM<sub>10</sub>**

Para PM<sub>10</sub> se encontraron cuatro (4) eventos de interés para ser simulados. Dos en la estación CSE, uno en EFZ y otro en SOCOL. A continuación, es posible encontrar las fichas del contaminante PM<sub>10</sub>.

Tabla 11. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 31 de agosto de 2021, contaminante PM10.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM1001
Datos básicos						
Contaminante	PM10		Ubicación	BOG	Fecha	31/08/2021
Estación	CSE		Tipo	Tráf / Ind	hora	9:00
Coordenadas geográficas	N	4.5958	Altura referencia	2	m	(sobre el nivel del suelo)
	O	74.1485	Resolución temporal	1	hora	
Máximo horario registrado	125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
Simulación 1: 1 hora antes del evento		Simulación 2: durante el evento		Simulación 3: 1 hora después del evento		
hora	8 hora		9 hora		10	
horas simuladas	3 horas simuladas		3 horas simuladas		3	
Mapa				Polígono en área	Intersección	
<p style="text-align: right;"><i>Diana Paola Ovalle González, 2022.</i></p>				ZSO1	NO	
				ZCSE	SI	
				ZCSE1	NO	
				ZCSE2	NO	
				ZPTE1	NO	
				ZPTE2	NO	
				ZMTV	NO	
				prob		
Análisis del evento						
<p>En el mapa es posible observar que las retrotrayectorias siguen un régimen de vientos que, para la simulada a las 8h inicia con una dirección oeste-suroeste que cambia a ser noroeste y finaliza llegando desde el norte-noroeste, la simulada a la hora del evento finaliza con una dirección norte, mientras que la retrotrayectoria de las 10h proviene con una dirección norte-noroeste y llega a la estación desde el este. Las tres retrotrayectorias presentan una altura inferior a los 5m y dado que todas sobrepasan por el polígono ZCSE, es posible concluir con una alta probabilidad, que las industrias que conforman dicho polígono pueden ser las causantes del episodio de contaminación por PM10 registrado. Entre las empresas conocidas en este polígono se encuentra una embotelladora y la producción de bebidas gaseosas, estos últimos, en su proceso productivo requieren de calderas para asegurar la dilución de materias primas (Quevedo, 2016), equipo que genera material particulado por el proceso de combustión que realiza.</p>						

En este caso, en la figura 12 es posible observar que la variabilidad de la dirección del campo de vientos es baja, puesto que, a la hora del evento, el viento llega desde el norte en la mayoría de los casos. Por lo cual, el análisis realizado para el episodio de contaminación registrado tiene un alto grado de precisión.

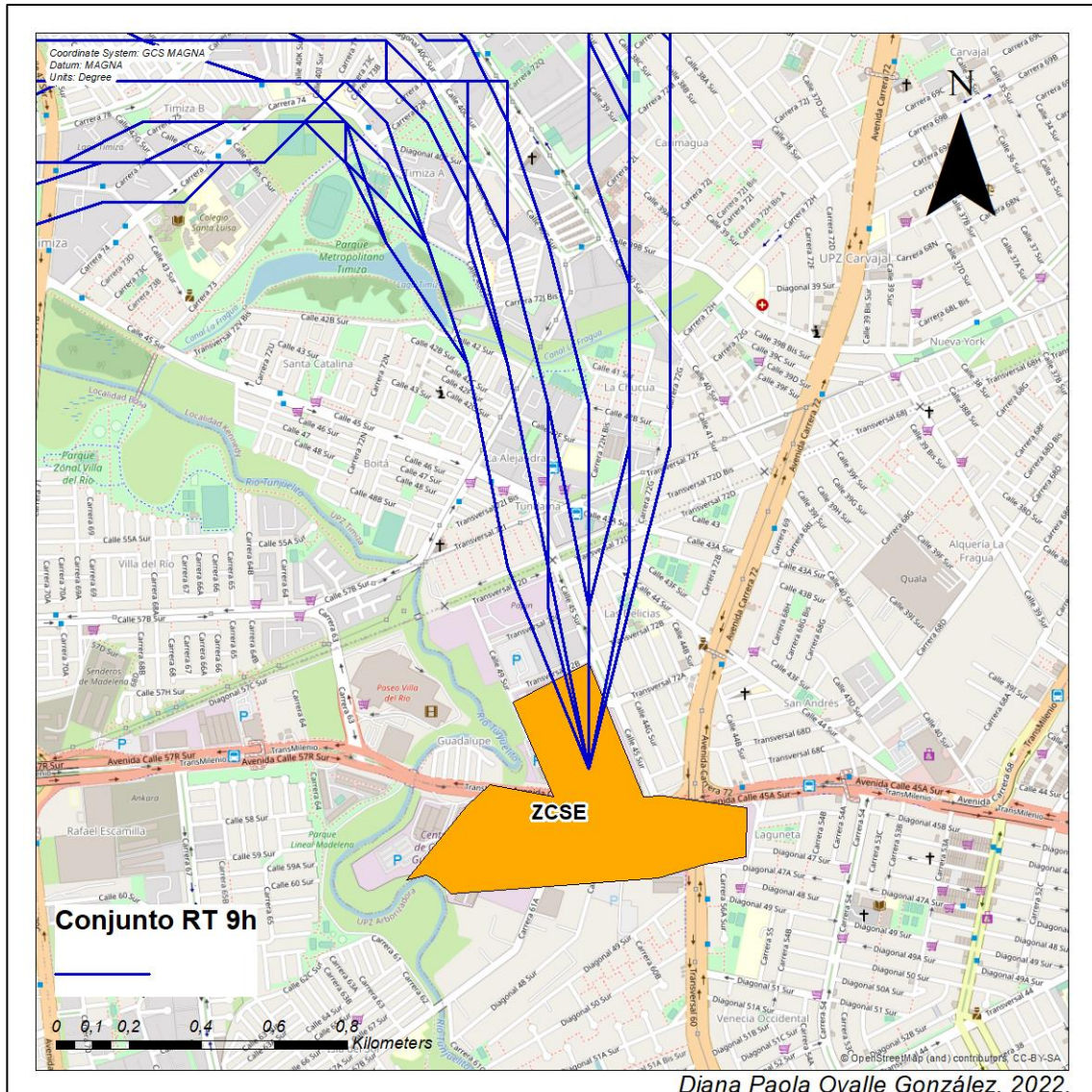


Figura 12. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 31/08/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 12. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 01 de diciembre de 2021, contaminante PM10.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM1002
<b>Datos básicos</b>						
<b>Contaminante</b>	PM10		<b>Ubicación</b>	BOG	<b>Fecha</b>	1/12/2021
<b>Estación</b>	CSE		<b>Tipo</b>	Tráf / Ind	<b>hora</b>	22:00
<b>Coordenadas geográficas</b>	N	4.5958	<b>Altura referencia</b>	2 m		(sobre el nivel del suelo)
	O	74.1485	<b>Resolución temporal</b>	1 hora		
<b>Máximo horario registrado</b>	109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
<b>Simulación 1: 1 hora antes del evento</b>		<b>Simulación 2: durante el evento</b>		<b>Simulación 3: 1 hora después del evento</b>		
hora	21		hora	22		23
horas simuladas	3		horas simuladas	3		3
<b>Mapa</b>					<b>Polígono en área</b>	<b>Intersección</b>
					ZSO1	NO
					ZCSE	SI
					ZCSE1	NO
					ZCSE2	NO
					ZMTE1	NO
					ZMTE2	NO
					ZMTV	NO
					prob	
<b>Análisis del evento</b>						
<p>En el segundo episodio de PM10 seleccionado para la estación CSE durante la transición de época de lluvias a época seca, se observa que las retrotrayectorias simuladas siguen un régimen de vientos bastante similar, donde todas llegan desde el noroeste con distancias muy cercanas entre los tres recorridos. Las tres retrotrayectorias son coincidentes en pasar por encima únicamente del polígono ZCSE a alturas inferiores a los 3m, de acuerdo con lo observado, es posible afirmar con una probabilidad alta, que la industria identificada en la ficha RPM1001 podría ser la misma causante de la alta concentración registrada durante el primero de diciembre, además, la industria se encuentra bastante cercana a la estación de calidad del aire.</p>						

A continuación, se puede observar el conjunto de retrotrayectorias que confirman la dirección del régimen de vientos presentados en el evento puntual simulado, y se observa a mayor detalle (escala 1:10.000) por cual zona es probable que haya pasado la nube del contaminante, confirmando la zona industrial que se conjetura pudo haber ocasionado el episodio de contaminación.

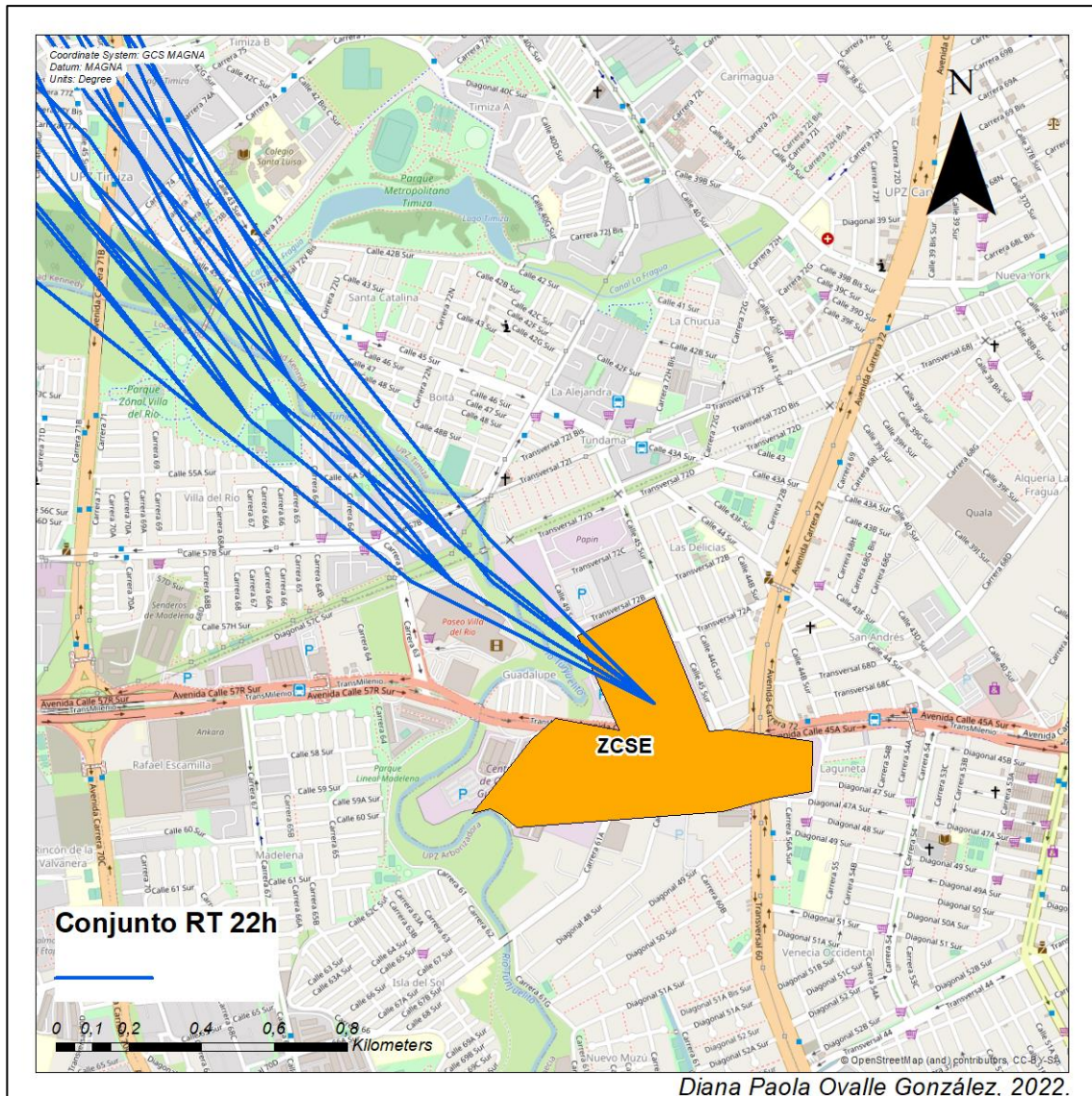


Figura 13. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 01/12/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 13. Evaluación Retrotrayectoria estación EFZ, 23 de abril de 2021, contaminante PM10.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM1003
Datos básicos						
Contaminante	PM10		Ubicación	Zipaquirá	Fecha	23/04/2021
Estación	EFZ		Tipo	Industrial	hora	20:00
Coordenadas geográficas	N	5.0100	Altura referencia	2 m		(sobre el nivel del suelo)
	O	74.0030	Resolución temporal	1 hora		
Máximo horario registrado	428 $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
Simulación 1: 1 hora antes del evento		Simulación 2: durante el evento		Simulación 3: 1 hora después del evento		
hora	19 hora		20 hora		21 hora	
horas simuladas	3 horas simuladas		3 horas simuladas		3 horas simuladas	
Mapa				Polígono en área	Intersección	
				ZEFZ	NO	
				ZEFZ1	NO	
Análisis del evento						
<p>En la gráfica es posible observar las largas distancias que recorren las retrotrayectorias en las horas simuladas, que asimismo, siguen una dirección similar, partiendo de una dirección noreste y llegando a la estación con una dirección norte. En este caso, ninguna de las tres simulaciones sobrevuela por un polígono industrial identificado para el presente estudio. Aunque las tres retrotrayectorias pasan por encima del municipio de Nemocón (perímetro resaltado en verde), el cual es el municipio con mayor extensión de territorio en Cundinamarca dedicado a la minería a cielo abierto y subterránea, las alturas de éstas se presentan entre 120 - 420m, 30 - 460m, y 94 - 370m respectivamente en las simulaciones realizadas a las 19h, 20h y 21h. Por otro lado, cuando las retrotrayectorias sobrevuelan la zona urbana del municipio de Zipaquirá cuentan con alturas de alrededor 60 m sobre el nivel del suelo. Por lo anterior, es posible afirmar con una nula probabilidad que el episodio de contaminación atmosférica por material particulado PM10 no fue originado por ninguna de las fuentes industriales identificadas, tampoco es posible afirmar que se haya generado de la minería del municipio de Nemocón ni de fuentes móviles en la zona urbana de Zipaquirá.</p>						



En este caso, es posible confirmar con alta confiabilidad el recorrido que pudo haber realizado el contaminante según la dirección de vientos registrada. Es coincidente con evidenciar que no pasa por ninguno de los polígonos industriales identificados para el estudio y, por el contrario, que los vientos provienen desde la zona urbana del municipio de Zipaquirá a alturas superiores a los 40m.

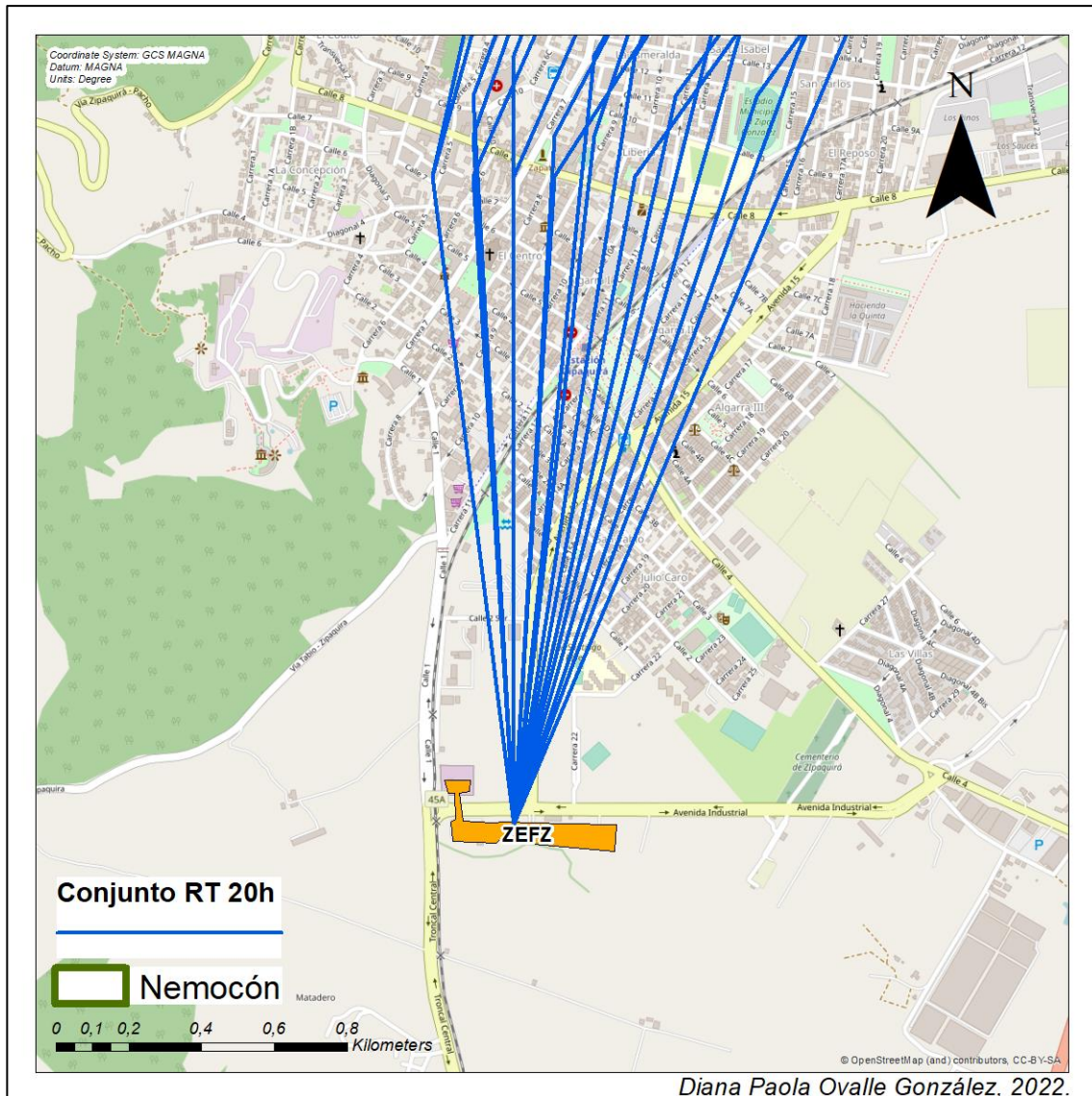


Figura 14. Retrotrayectoria conjunta para estación EFZ, 23/04/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 14. Evaluación Retrotrayectoria estación SOCOL, 12 de julio de 2021, contaminante PM10.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM1004
Datos básicos						
Contaminante	PM10		Ubicación	BOG	Fecha	12/07/2021
Estación	SOCOL		Tipo	Punto crítico	hora	12:00
Coordenadas geográficas	N	4.5960	Altura referencia	2 m	(sobre el nivel del suelo)	
	O	74.1950	Resolución temporal	1 hora		
Máximo horario registrado	118	µg/m <sup>3</sup>				
Simulación 1: 1 hora antes del evento		Simulación 2: durante el evento		Simulación 3: 1 hora después del evento		
hora	11	hora	12	hora	13	
horas simuladas	3	horas simuladas	3	horas simuladas	3	
Mapa				Polígono en área		Intersección
<p>Diana Paola Ovalle González, 2022.</p>				ZSO1	NO	
				ZCSE	NO	
				ZCSE1	NO	
				ZCSE2	NO	
				ZPTE3	NO	
Análisis del evento						
<p>La estación de calidad del aire SOCOL esta ubicada en una zona urbana, cerca a un colegio, presenta alto flujo vehicular y existen pequeñas empresas en el sector, por ello, y según el protocolo se considera como de punto crítico. Según el análisis de retrotrayectorias, ninguna sobrepasa algún polígono industrial identificado en el presente estudio a pesar de seguir direcciones en el campo de vientos similares, por otro lado, después de la altura inicial (2m) que se establece en las condiciones de la simulación, se reportan alturas por encima de los 60m y, en los tres casos simulados, se encuentran dichos reportes después de 5 Km de recorrido desde la estación, en ese sentido, es posible afirmar que existe una probabilidad nula que el episodio fue generado por un polígono industrial identificado. En este caso, se podría tratar de un episodio de contaminación atmosférica generado por fuentes móviles o alguna situación en particular de la zona, puesto que en la gráfica del capítulo 3 (Figura 6) se evidencia que los niveles reportados por la estación son cambiantes y no siguen un patrón de tráfico vehicular, por lo cual, aunque para la información que se tiene, la probabilidad que algún polígono industrial haya ocasionado el evento es nula, el episodio podría haber sido causado por alguna pequeña empresa, de carpintería o metalúrgica (identificados a priori por medio de google maps) que pudo generar los altos niveles de PM10 reportados durante los 14 días de superación a la norma que empezaron el 01 de julio.</p>						

El recorrido que realiza el conjunto de retrotrayectorias simuladas a la hora del evento evidencian que el viento tiene una dirección bastante clara y que proviene del sureste, tal y como se evidenció en las tres retrotrayectorias realizadas y analizadas en la tabla 14 para el episodio de PM10 en la estación SOCOL, por lo cual, es posible descartar cualquiera de los polígonos identificados en el presente estudio como fuente de la emisión.

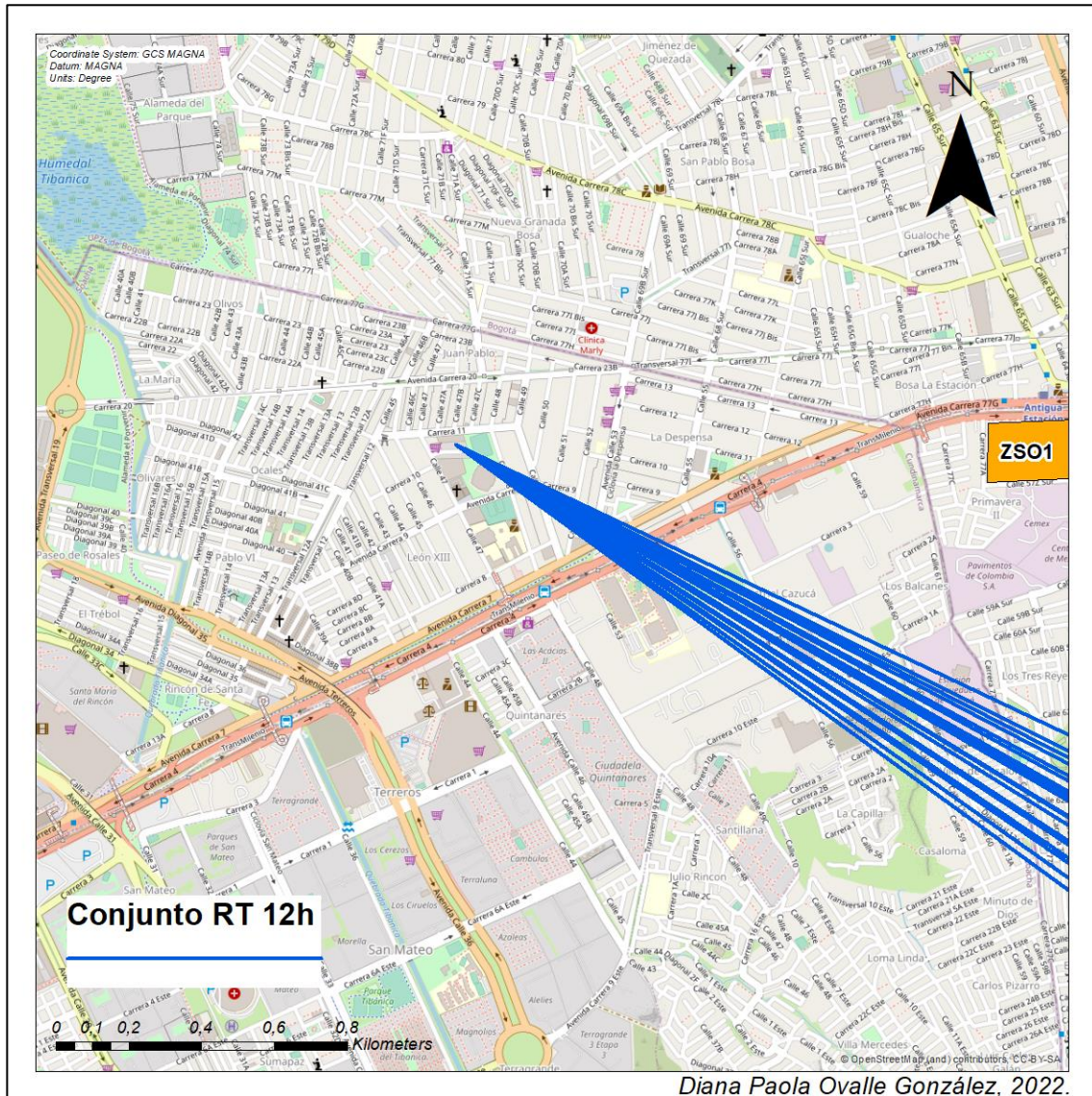


Figura 15. Retrotrayectoria conjunta para estación SOCOL, 12/07/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022

### 3.1.2. PM<sub>2,5</sub>

Para el contaminante criterio PM<sub>2,5</sub> se seleccionaron tres (3) eventos de interés para ser simulados, uno en la estación CSE, uno en PTE y otro en SOCOL. A continuación, es posible encontrar las fichas de la evaluación correspondiente.

Tabla 15. Evaluación Retrotrayectoria estación CSE, 19 de noviembre de 2021, contaminante PM<sub>2,5</sub>.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM2501
Datos básicos						
Contaminante	PM <sub>2,5</sub>		Ubicación	BOG	Fecha	19/11/2021
Estación	CSE		Tipo	Tráf / Ind	hora	2:00
Coordenadas geográficas	N	4.5958	Altura referencia	2	m	(sobre el nivel del suelo)
	O	-74.1485	Resolución temporal	1	hora	
Máximo horario registrado	182	µg/m <sup>3</sup>				
Simulación 1: 1 hora antes del evento		Simulación 2: durante el evento		Simulación 3: 1 hora después del evento		
hora	1	hora	2	hora	3	
horas simuladas	3	horas simuladas	3	horas simuladas	3	
Mapa				Polígono en área		Intersección
<p>Diana Paola Ovalle González, 2022.</p>				ZSO1	NO	
				ZCSE	SI	
				ZCSE1	NO	
				ZCSE2	NO	
				ZPTE1	NO	
				ZPTE2	NO	
				ZMTV	NO	
				prob		
Análisis del evento						
<p>En el episodio de PM<sub>2,5</sub> seleccionado para la estación CSE, se observa que las retrotrayectorias simuladas siguen un régimen de vientos bastante similar, donde todas llegan desde el noroeste con distancias muy cercanas entre los tres recorridos. Las tres retrotrayectorias simuladas a las 1h y 2h provienen desde el noroeste, mientras que la retrotrayectoria simulada a las 3h aunque también presente una dirección noroeste en la mayoría de su recorrido, llega desde el este-noroeste. En este caso, las 3 retrotrayectorias son coincidentes en pasar por encima únicamente del polígono ZCSE, donde lo sobrepasan con alturas inferiores a los 3m, de acuerdo con lo observado, es posible afirmar con una probabilidad alta, que las empresas ubicadas en este polígono industrial podrían ser las causantes de la alta concentración registrada de PM<sub>2,5</sub>. Podría ser posible que la misma caldera/industria sea la causante de los múltiples episodios que se registran para la estación de calidad del aire CSE.</p>						

De las 27 retrotrayectorias resultantes de una simulación en conjunto, para este caso, 3 de ellas tienen direcciones iniciales opuestas al restante, sin embargo, a medida que se van acercando a la estación de calidad del aire CSE, toman una dirección similar a las 24 retrotrayectorias restantes. Es posible afirmar que el análisis realizado en la tabla 15 es acertado con una confiabilidad buena – aceptable.

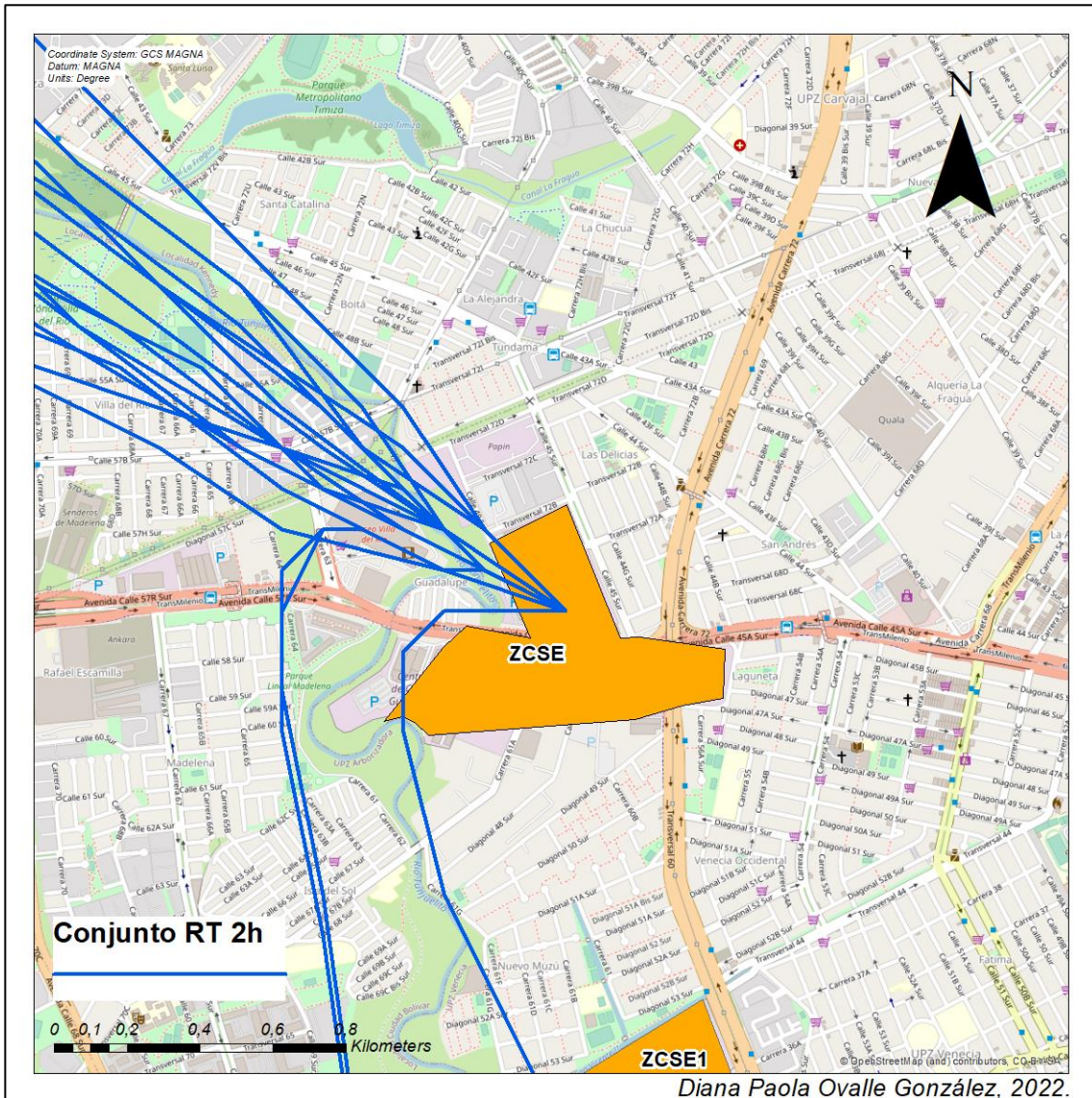


Figura 16. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 19/11/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022

Tabla 16. Evaluación Retrotrayectoria estación PTE, 06 de marzo de 2021, contaminante PM2,5.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM2502
Datos básicos						
Contaminante	PM <sub>2,5</sub>		Ubicación	BOG	Fecha	6/03/2021
Estación	PTE		Tipo		hora	8:00
Coordenadas geográficas	N	4.6320	Altura referencia	2	m	(sobre el nivel del suelo)
	O	74.1180	Resolución temporal	1	hora	
Máximo horario registrado	77	µg/m <sup>3</sup>				
Simulación 1: 1 hora antes del evento		Simulación 2: durante el evento		Simulación 3: 1 hora después del evento		
hora	7	hora	8	hora	9	
horas simuladas	3	horas simuladas	3	horas simuladas	3	
Mapa				Polígono en área	Intersección	
<p style="text-align: right; font-size: small;">Diana Paola Ovalle González, 2022.</p>				ZPTE1	SI	
				ZPTE2	NO	
				ZPTE3	NO	
				ZMSTV	SI	
				ZFTB1	NO	
				ZFTB2	SI	
				ZFTB3	NO	
				ZFTB4	NO	
				ZFTB5	NO	
				ZCOT	NO	
				ZMSTV	NO	
				prob		
Análisis del evento						
<p>Para el presente caso, las retrotrayectorias simuladas a las 8h y 9h llegan desde el oeste-noroeste mientras que la simulada a las 7h llega con una dirección un poco más hacia el norte (noroeste), sin embargo, a cierta distancia, todas inician con dirección norte. La retrotrayectoria simulada a las 7h es la única que pasa por encima de los polígonos ZMSTV y ZFTB2 a una altura de aproximadamente de 0m y 2.8m respectivamente, asimismo, dichos polígonos se encuentran a alrededor de 1.3Km y 6Km lineales respectivamente de la estación PTE, por lo cual, podemos concluir que el reporte de las altas concentraciones de PM<sub>2,5</sub> pudo haber sido ocasionado desde cualquiera de los anteriores polígonos identificados. De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar, con una baja probabilidad, que alguna o varias de las industrias que conforman el polígono ZMSTV o ZFTB2, pudieron ser las causantes del episodio de contaminación atmosférica reportado, probablemente fue ocasionado por el polígono que se encuentra más cercano a la estación (ZMSTV), sin embargo, la incertidumbre es alta, puesto que juntos polígonos cuentan con industrias de manufactura, alimentos y/o industria química. Por otro lado, las demás retrotrayectorias no sobrevuelan sobre ninguna de las zonas industriales que se encuentran en el área del mapa.</p>						

En este caso, es posible observar que el conjunto de retrotrayectorias simuladas a la hora del evento (8h) permite realizar un análisis con diferente resultado a lo obtenido en la tabla 16. Anteriormente, se observa que la retrotrayectoria simulada una hora antes del pico máximo del episodio de contaminación atmosférica cruza por una esquina del polígono ZMTV y sobrepasa por completo el polígono ZFTB2, ambos a alturas bastante razonables. En este caso, las retrotrayectorias sobrepasan por los polígonos ZFTB1 y ZFTB3, así como el Aeropuerto Internacional El Dorado que no habían sido contemplados en el análisis realizado con anterioridad. Para el caso de ZFTB1 las 5 retrotrayectorias que pasan por encima, reportan alturas de alrededor 0 m, mientras que para ZFTB3, se registran alturas máximas de alrededor 8m y mínimas de alrededor 1m. Por lo anterior, la certeza de los resultados obtenidos para este caso es media – baja puesto que existen muchos posibles focos que son sobrepasados por el campo de vientos identificado por la meteorología.

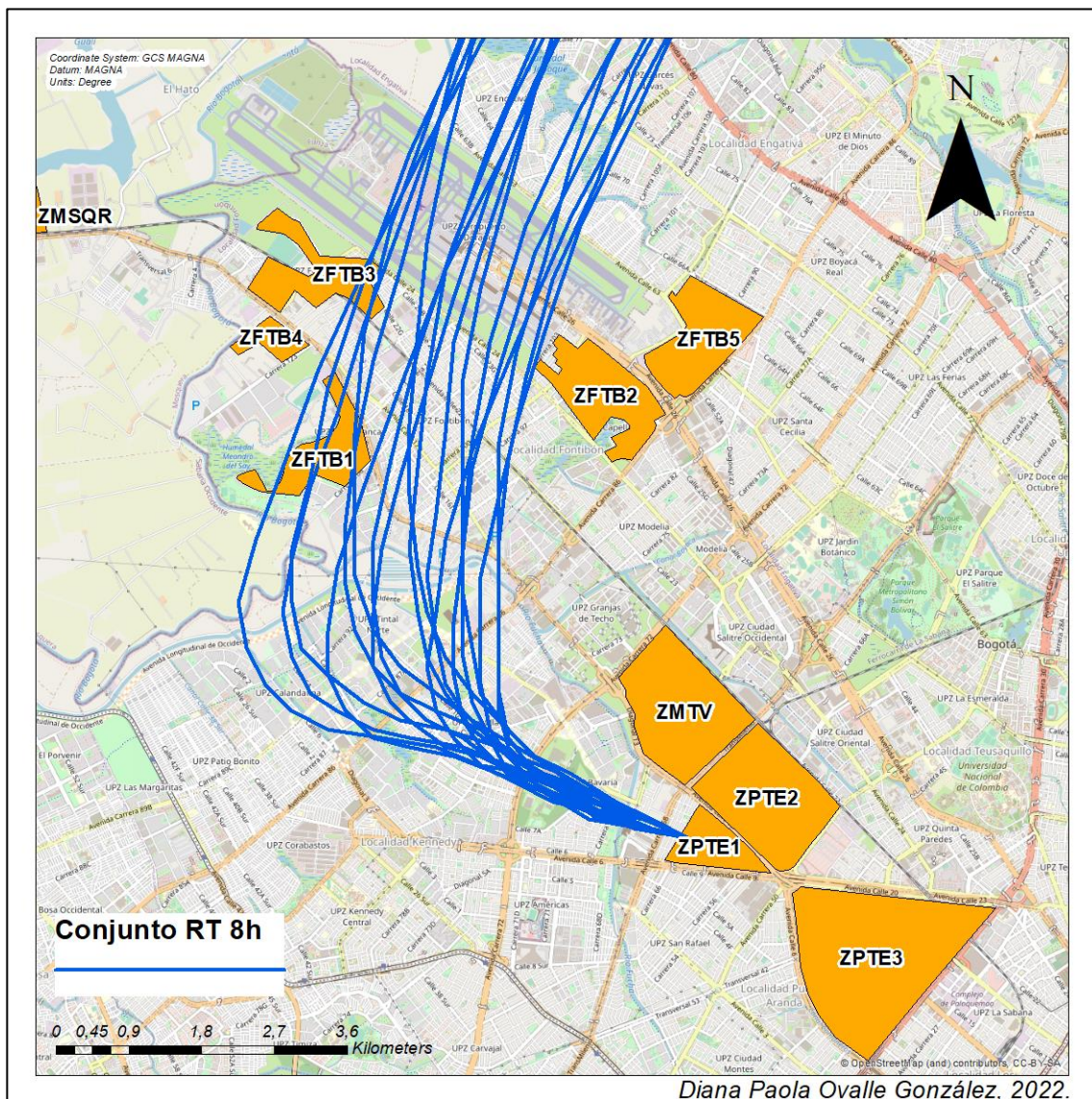


Figura 17. Retrotrayectoria conjunta para estación PTE, 06/03/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Tabla 17. Evaluación Retrotrayectoria estación SOCOL, 26 de marzo de 2021, contaminante PM2,5.

FICHA DE EVALUACIÓN PARA RETROTRAYECTORIAS					ID	RPM2503
Datos básicos						
Contaminante	PM <sub>2.5</sub>		Ubicación	BOG	Fecha	26/03/2021
Estación	SOCOL		Tipo	Punto crítico	hora	6:00
Coordenadas geográficas	N	4.5960	Altura referencia	2	m	(sobre el nivel del suelo)
	O	74.1950	Resolución temporal	1	hora	
Máximo horario registrado	190	µg/m <sup>3</sup>				
Simulación 1: 1 hora antes del evento		Simulación 2: durante el evento		Simulación 3: 1 hora después del evento		
hora	5	hora	6	hora	7	
horas simuladas	3	horas simuladas	3	horas simuladas	3	
Mapa				Polígono en área		Intersección
<p>Diana Paola Ovalle González, 2022.</p>				ZSO1	NO	
				ZCSE	NO	
				ZMSQR	NO	
				ZFTB1	NO	
				ZFTB3	NO	
				ZFTB4	NO	
				ZFTB5	NO	
				ZMTV	NO	
				prob		
Análisis del evento						
<p>Para el presente evento de PM<sub>2.5</sub> en la estación SOCOL, el campo de vientos permite evidenciar que las retrotrayectorias llegan a la estación con dirección en la componente norte, aunque la retrotrayectoria simulada a las 5h inicie su recorrido desde el norte-noroeste y la retrotrayectoria simulada a las 7h inicie su recorrido desde el norte-noreste. Como es posible observar en el mapa, ninguna de las retrotrayectorias sobrepasa por ninguno de los polígonos industriales identificados en el estudio, por lo anterior, existe una nula probabilidad que haya sido ocasionado por fuentes fijas. Por otro lado, en el capítulo 2.4.1., figura 10, se analiza que el comportamiento que presenta el episodio de contaminación atmosférica puede responder a fuentes móviles, debido a que la carrera 11, ubicada justo al frente por la cara norte de la estación de calidad del aire, presenta alto tráfico vehicular y no se encuentra totalmente pavimentada, sin embargo, tampoco es claro en el comportamiento horario de los 4 días consecutivos en que se presenta la superación a la norma.</p>						



El conjunto de retrotrayectorias para el episodio de PM2,5 permite corroborar que el campo de vientos llega desde la componente norte, y que se inclina más por la dirección que toma la simulación de después de la hora del evento (7h), y presenta una alta precisión debido a que todas las retrotrayectorias provienen de la misma dirección. En este caso, el episodio de contaminación atmosférica por superaciones a la norma de PM2,5 no se puede atribuir a una fuente fija identificada por el presente estudio, por el contrario, en el campo de vientos no existe ningún polígono cercano, por lo anterior, y en concordancia con el análisis realizado en la tabla 17, para el presente caso, por la dirección del viento registrado, es posible que el estado de la vía y el alto tráfico vehicular de la carrera 11 pueda ser la causante del episodio.

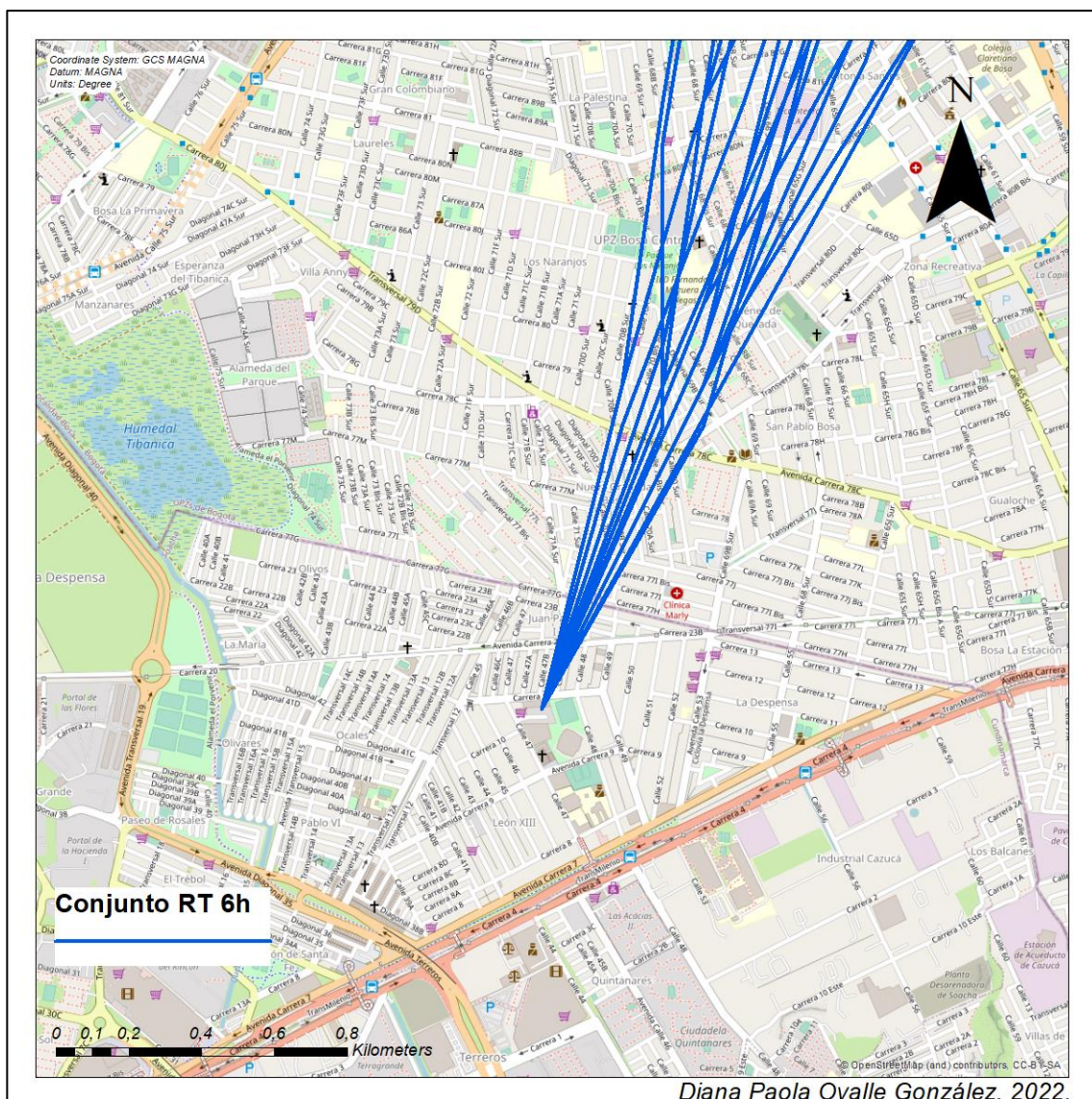


Figura 18. Retrotrayectoria conjunta para estación SOCOL, 26/03/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.



En este caso, el conjunto de retrotrayectorias permiten observar cierta estabilidad del campo de vientos durante el tiempo simulado el día 16 de julio en la estación de calidad del aire CSE. De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que posee una baja precisión el resultado para largas distancias en este caso, sin embargo, también es posible concluir que el viento presentaba una estabilidad moderada, lo que permite concluir que el contaminante SO<sub>2</sub> fue originado en un área cercana a la estación CSE, confirmando el análisis realizado en la tabla 18.

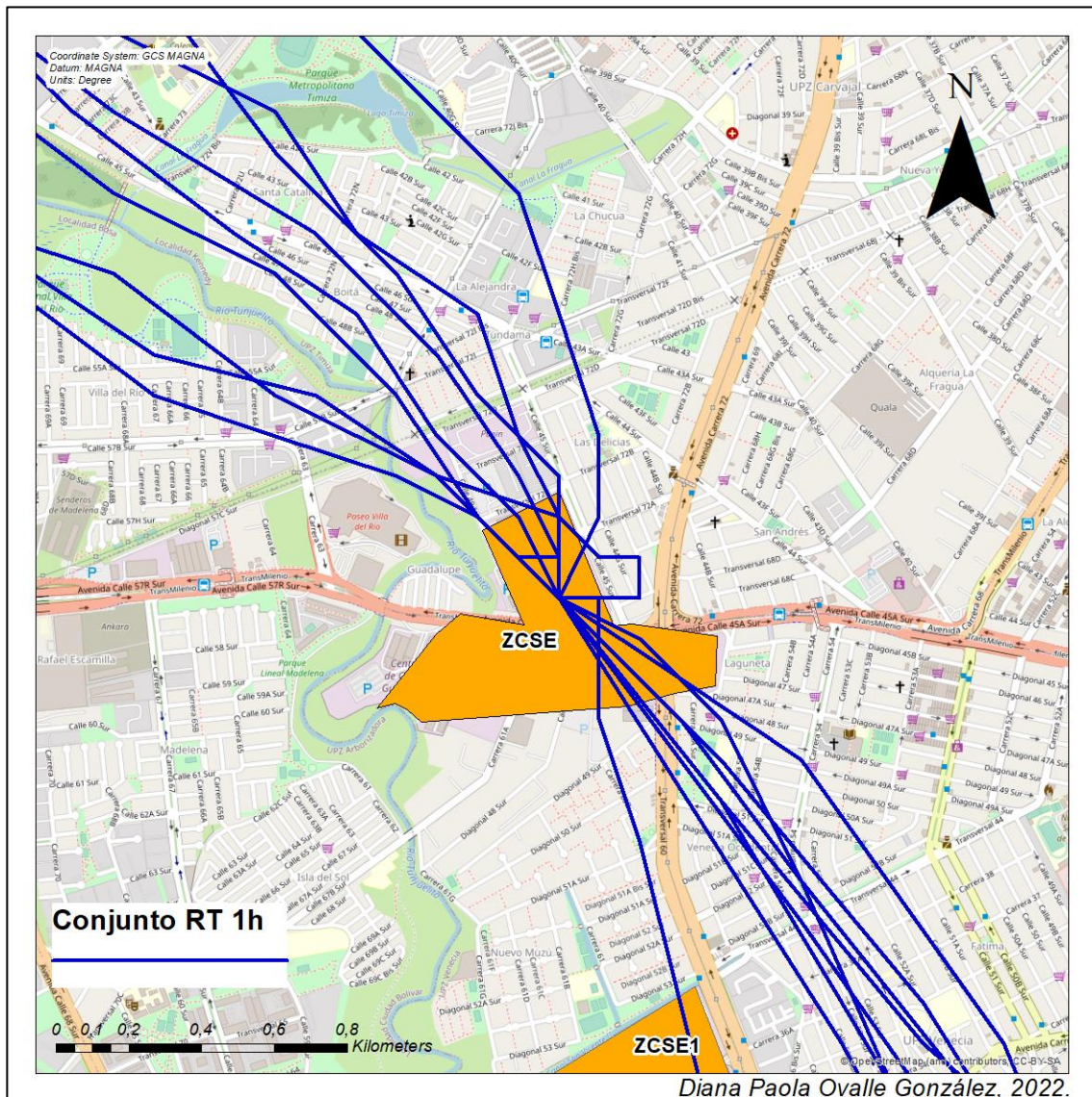


Figura 19. Retrotrayectoria conjunta para estación CSE, 16/07/2021. Fuente: Elaboración propia, 2022.

## 3.2 Resumen de los resultados obtenidos

El estudio de episodios de contaminación atmosférica por medio de retro trayectorias empleando modelos como HYSPLIT permite descartar fuentes fijas como posibles focos emisores, a la vez que ayuda a identificar si alguna fuente emisora podría haber generado la superación a la norma del contaminante, todo lo anterior con cierto grado de probabilidad establecido a partir del régimen de vientos y de la altura del recorrido que describe la retro trayectoria. Por otro lado, las retro trayectorias conjuntas permiten evidenciar la precisión de los resultados de cada evento simulado, por ello, también son necesarias para identificar que tan oportuno es el análisis y los resultados obtenidos. Es preciso recordar que la evaluación de estos episodios y eventos puntuales permite la formulación de herramientas de gestión más aterrizadas y enfocadas a actividades económicas puntuales. A continuación, es posible observar la tabla 19 donde se enuncian los datos y resultados a resaltar de cada evento simulado con retro trayectorias y retro trayectorias conjuntas.

Tabla 19. Resumen de la evaluación de los eventos seleccionados para el estudio.

Contaminante	Ficha	Estación	Fecha	Polígono sobrepuesto	Probabilidad de influencia	Precisión del análisis de cada evento
PM <sub>10</sub>	PM1001	CSE	31/08/2021	ZCSE		Alta
PM <sub>10</sub>	PM1002	CSE	1/12/2021	ZCSE		Alta
PM <sub>10</sub>	PM1003	EFZ	23/04/2021	No aplica		Alta
PM <sub>10</sub>	PM1004	SOCOL	12/07/2021	No aplica		Alta
PM <sub>2,5</sub>	PM2501	CSE	19/11/2021	ZCSE		Moderada
PM <sub>2,5</sub>	PM2502	PTE	6/03/2021	ZMTV, ZFTB2		Alta
PM <sub>2,5</sub>	PM2503	SOCOL	26/03/2021	No aplica		Alta
SO <sub>2</sub>	RSO2	CSE	16/07/2021	ZCSE		Baja

Inicialmente, el análisis de episodios de contaminación arroja que de las 35 estaciones de calidad del aire ubicadas en Bogotá región pertenecientes a la red de calidad del aire, solo el 83% cuenta con datos válidos (75% de datos válidos al año según el protocolo del IDEAM) en por lo menos un contaminante criterio de interés y tan solo el 45% de ellas es útil para el análisis de los tres contaminantes (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y SO<sub>2</sub>).

Asimismo, se concluye que Bogotá región sufrió durante el año 2021 más episodios de contaminación atmosférica por material particulado PM<sub>10</sub> con un total de 125 días; presentándose 21 episodios en el suroeste de Bogotá con 79 días de superación a la norma en la estación CSE, 7 episodios en el suroeste de Bogotá región, en el municipio de Soacha reportados por la estación SOCOL que suman 41 días del año por encima de los 75 µg/m<sup>3</sup> permitidos por la Resolución 2254 de 2017 siendo el que registro valores de 2.4 veces más (181 µg/m<sup>3</sup>) lo establecido como referencia. Finalmente, la estación EFZ ubicada al norte de Bogotá región en el

municipio de Zipaquirá reporta un único episodio que duró 5 días consecutivos y llegó a superar la norma diaria en 1.5 veces su valor.

Para material particulado PM<sub>2,5</sub>, Bogotá región durante 2021 presentó episodios de contaminación atmosférica en cuatro estaciones, de las cuales, nuevamente CSE tiene el mayor número de días de superaciones a la norma, que asciende a 108 días distribuidos en 15 episodios, y para este caso, es el que registra el valor más alto, siendo mayor al doble de lo establecido en la resolución (37 µg/m<sup>3</sup>). En la estación SOCOL se reportan tres episodios que suman 10 días por encima del valor normativo, mientras que en las estaciones MOV2 y PTE, que se encuentran al interior de Bogotá (centro geográfico) se reportan tres episodios que suman un total de 9 días.

Por último, como previamente se mencionó, para el caso del contaminante SO<sub>2</sub> no se encontraron días consecutivos de superaciones a la norma, el periodo más largo registrado fue de ocho horas consecutivas y fue el empleado para el análisis, sin embargo, en este caso, las superaciones registran valores hasta de 3.5 veces más a lo determinado por la resolución que establece el valor de 100 µg/m<sup>3</sup> horarios, valores bastante alarmantes en términos de calidad ambiental.

De acuerdo con lo que es posible observar, el 50% de los eventos evaluados proceden con una alta probabilidad de influencia de polígonos industriales identificados en el presente estudio, sin embargo, tan solo 2 de ellos, presentan una baja incertidumbre, es decir, los eventos de las fichas PM1001, PM1002, es muy seguro que hayan sido ocasionados por alguna industria del polígono ZCSE. Por otro lado, para el evento de la ficha PM2501, aunque la probabilidad de influencia del polígono es alta, se evidencia en la figura 16 que su incertidumbre es moderada, mientras que para el evento evaluado por medio de la ficha RSO2 se presenta una incertidumbre alta, es decir, no podríamos afirmar con los datos obtenidos que el episodio de contaminación atmosférica por dióxido de azufre fue ocasionado por una industria del polígono ZCSE, se requiere más información para llegar a una conclusión que presente menos incertidumbre.

No se encontraron resultados con probabilidad media, mientras que la ficha PM2502 reporta una probabilidad baja de suceso, que evidencia el sobrevuelo de una misma retrotrayectoria sobre dos polígonos industriales identificados, no obstante, el conjunto de retrotrayectorias del mismo evento, evidencia el sobrevuelo de otros dos polígonos totalmente diferentes, en este caso, no es correcto afirmar ni descartar ningún polígono industrial, por el contrario, si se desea ahondar en qué pudo generar este episodio, se requiere de mayor información para llegar a descartar polígonos industriales.

Finalmente, tres eventos, todos ubicados en Cundinamarca (región), presentan una probabilidad nula de haber sido generados desde alguno de los polígonos industriales identificados, es decir, desde fuentes fijas, asimismo, es preciso resaltar que todos cuentan con una baja incertidumbre, por lo cual, dichos eventos podrían adjudicarse con certeza a fuentes móviles u otras industrias que no hayan sido identificadas dentro de un polígono y que se encuentren por debajo de las retrotrayectorias obtenidas para cada evento.

### 3.3 Discusiones

Las retrotrayectorias simuladas en HYSPLIT permitieron establecer la posible incidencia de alguno o varios de los 25 polígonos industriales con los episodios de contaminación atmosférica seleccionados según los criterios establecidos en la metodología con gran satisfacción, los resultados eran acordes a lo que se esperaba según lo visto y reportado por los informes anuales de calidad del aire para Bogotá y Cundinamarca, donde la estación CSE (Carvajal – Sevillana) siempre obtiene indicadores de calidad del aire bajos para todos los contaminantes medidos, incluyendo NOx y black carbon (Alcaldía Mayor de Bogotá & Secretaria Distrital de Ambiente, 2021).

El modelo permite obtener conclusiones con una alta certeza del análisis de los resultados en el 75% de los eventos simulados, valor bastante favorable para el análisis de episodios de contaminación atmosférica y el descarte de posibles fuentes fijas en un área como lo es Bogotá región donde existen múltiples focos en un área limitada y abundante en polígonos industriales. Por otro lado, es preciso resaltar una vez más, que esta herramienta no señala quien fue el generador de la superación a la norma, sino para descartar posibles causantes, por lo cual, si se desea aplicar como herramienta de control por parte de entes regulatorios, requiere del apoyo de otras herramientas, metodologías y/o registros para definir actores específicos.

Analizando lo escrito en *Quantifying COVID- 19's Silver Lining* (Blackman et al., 2021) donde afirman que se presenta mayor número de episodios en los meses de febrero, marzo, enero y finalmente abril debido a la inversión térmica que atrapa los contaminantes a nivel del suelo, y observando lo obtenido en el presente estudio se difiere de los resultados, debido a que se identifica que los meses de septiembre (8 episodios), mayo (8 episodios), octubre (7 episodios), marzo (6 episodios) y julio (6 episodios) son los que presentan mayor concurrencia de superaciones a la norma, lo cual no es posible asociarlo a la capa límite atmosférica ni al régimen climático de los meses, por lo cual, podría estar atribuido a condiciones locales del territorio. Por otro lado, los meses de noviembre, marzo y julio son los que presentan mayor frecuencia en episodios largos, siendo de 23 días el episodio más largo registrado para el contaminante PM<sub>2,5</sub> en la estación CSE que inicio el 12 de noviembre, 15

días reportados de igual manera en la misma estación y mismo contaminante pero que inicio el 17 de marzo y de 14 días en la estación SOCOL que inicio el incumplimiento a la norma el 14 de julio.

Asimismo, es esperado que durante la época de lluvias se presenten menos episodios de contaminación atmosférica debido a las condiciones meteorológicas, como la alta precipitación, que ayudan a disipar y transportar los contaminantes hacia otros medios (liquido) para que queden contenidos y no sigan suspendidos en el aire, a diferencia de las condiciones estables que se presentan durante las épocas secas, sin embargo, como se observa en la tabla 6, durante los meses de época de lluvia se presentaron 38 episodios de contaminación atmosférica, mientras que durante la época seca fueron 24 episodios en total, evidenciados tanto para PM<sub>10</sub> (55%) como para PM<sub>2,5</sub> (71%), por otro lado, los episodios señalados para SO<sub>2</sub> se encuentran 6 en época de lluvias y los otros 6 en época seca. Según el estudio *“Chemical composition and source apportionment of PM<sub>10</sub> at an urban background site in a high–altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia)”* (Ramírez et al., 2018) es posible plantear que la mayoría de los episodios se generen en época de lluvias en Bogotá y su área metropolitana posiblemente por la alta nubosidad y baja radiación solar que predomina durante estos meses, en ese sentido, la altura de la capa de mezcla queda reducida durante la mayoría de horas del día, concentrando los gases y partículas en la atmósfera más cercana a la superficie.

Por otro lado, los análisis del presente estudio arrojan resultados similares con el estudio de Blackman en 2021 cuando se habla de la distribución espacial de los episodios. Por ejemplo, 28 de los 29 episodios causados por PM<sub>10</sub> son registrados en las estaciones hacia el suroeste de Bogotá región, que comprende a la estación CSE y las estaciones de Soacha (SOCOL) y tan solo un episodio, el registrado en la estación EFZ fue originado hacia el norte del área de estudio. Por lo cual, es preciso resaltar que el centro y sureste de Bogotá región requieren de mayor atención en la formulación y ejecución de medidas para el seguimiento y control de la contaminación atmosférica.





## CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue realizar una evaluación ambiental a los episodios de contaminación atmosférica en Bogotá región durante el año 2021 empleando el modelo HYSPLIT que ha proporcionado Meteosim SL. Para ello, se ha desarrollado una metodología de selección de eventos por tipo de contaminante criterio primario, para la posterior simulación de retrotrayectorias y retrotrayectorias conjuntas, y así, poder analizar, caso a caso, qué fuentes fijas no pudieron haber generado los eventos y si alguno de los polígonos industriales identificados pudo haber ocasionado el episodio de contaminación, basados en un grado de probabilidad e incertidumbre, donde se obtienen las siguientes conclusiones:

1. El contaminante que presenta más superaciones a la norma durante 2021 es el PM<sub>10</sub> con 125 días, sin embargo, el que presenta superaciones más altas a la norma es SO<sub>2</sub> con el limite horario, donde se registran hasta 3,5 veces por encima.
2. La estación de calidad del aire Carvajal – Sevillana (CSE) es la que más episodios de contaminación atmosférica presenta para los tres contaminantes estudiados, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y SO<sub>2</sub>, asimismo, se confirma lo analizado por otros autores, donde se afirma que el suroeste de la región es el que más sufre de episodios de contaminación atmosférica.
3. El estudio realizado refleja la carencia de información de meteorología y de calidad del aire válida en tiempo real por parte de las autoridades ambientales para una región tan compleja como Bogotá y su área metropolitana, en ese orden, se evidencia la necesidad de ampliar el número de estaciones y garantizar la operabilidad válida de las estaciones ya instaladas de la red de calidad del aire para el área de estudio, en especial de las áreas que reportan, no solo por el presente estudio, sino por los boletines de calidad del aire de la ciudad, superaciones continuas y prolongadas a la Resolución 2254 de 2017.
4. Los datos obtenidos, seleccionados y analizados para su aplicación en herramientas de análisis de eventos como lo fue el modelo HYSPLIT en el presente estudio, son prácticos y relevantes para estudios de calidad del aire en los territorios, puesto que permiten establecer medidas o direccionar los planes hacia ciertos focos emisores y descartar orígenes.
5. Los resultados demuestran que se requiere establecer planes, programas y sistemas de vigilancia acordes a la necesidad de estaciones críticas, como lo es CSE, que presentan superaciones a la norma con bastante frecuencia, debido las repercusiones a la salud y calidad ambiental que genera en la zona.

6. Se recomienda un futuro estudio donde se obtenga información de calidad del aire y se conozcan las emisiones procedentes de fuentes fijas puntuales de estaciones como CSE, para aplicar el modelo HYSPLIT con retrotrayectorias y trayectorias y dispersión.

## REFERENCIAS

- Alarcón, M., Periago, C., Pino, D., Mazón, J., Casas-Castillo, M. del C., Ho-Zhang, J. J., De Linares, C., Rodríguez-Solà, R., & Belmonte, J. (2022). Potential contribution of distant sources to airborne *Betula* pollen levels in Northeastern Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, 818, 151827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151827>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, & Secretaria Distrital de Ambiente. (2021). *INFORME ANUAL DE CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ AÑO 2020*, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. 1–163. [http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe\\_Anuar\\_2009\\_RMCAB.pdf](http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe_Anuar_2009_RMCAB.pdf)
- Blackman, A., Bonilla, J. A., & Villalobos, L. (2021). *Quantifying COVID- 19 ' s Silver Lining : Avoided Deaths from Air Quality Improvements in Bogotá* Quantifying COVID- 19 ' s Silver Lining : Avoided Deaths from Air Quality Improvements in Bogotá. November.
- Brimblecombe, P. (2019). Air Pollution Episodes. *Encyclopedia of Environmental Health*, 41–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11638-0>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2015). *Estado de Bogotá Región*. 1–4. <http://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/13298>
- Castagna, J., Senatore, A., Bencardino, M., D'Amore, F., Sprovieri, F., Pirrone, N., & Mendicino, G. (2021). Multiscale assessment of the impact on air quality of an intense wildfire season in southern Italy. *Science of the Total Environment*, 761, 143271. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143271>
- DANE. (2005). *CENSO GENERAL 2005 - RESULTADOS ÁREA METROPOLITANA DE BOGOTÁ*. 1–50. [http://www.dane.gov.co/files/censo2005/resultados\\_am\\_municipios.pdf](http://www.dane.gov.co/files/censo2005/resultados_am_municipios.pdf)
- Franceschi, F., Cobo, M., & Figueredo, M. (2018). Discovering relationships and forecasting PM10 and PM2.5 concentrations in Bogotá Colombia, using Artificial Neural Networks, Principal Component Analysis, and k-means clustering. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5), 912–922. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.006>
- IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. (2005). Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tujuelo. *BMC Public Health*, 5(1), 1–8. <https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298%0Ahttp://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005%0Ahttp://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58%0Ahttp://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2012). Formato Común Hoja Metodológica Índice de calidad del aire ( ICA ) Formato Común Hoja Metodológica. *Ideam*, 1–8.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático - IDIGER. (2020). *Caracterización Climatológica De Bogotá, Como Un Aporte Al Fortalecimiento De La Red Hidrometeorológica De Bogotá (Rhb)*. 69. <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/558631/Caract+Climatológica++Bogotá+%281%29.pdf/b5dbcea1-d291-40a0-8ee8-71ca322edcab>
- Julian, M., Bassil, N., & Dellagi, S. (2020). *Causes and impacts of air pollution on international society. Case study: Possible solutions for Lebanon*. 020008. <https://doi.org/10.1063/5.0032670>
- Niveles Calidad del Aire., 11 (2017). chrome-

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.ideam.gov.co/docu-  
 ments/51310/527391/2.+Resolución+2254+de+2017+-  
 +Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f
- MADS, M. de A. y D. S. (2019). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire: Vol. XI*.  
 chrome-  
 extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.minambiente.gov.co/  
 wp-  
 content/uploads/2022/04/ESTRATEGIA\_NACIONAL\_DE\_CALIDAD\_DEL\_AIRE  
 \_1.pdf
- MAVDT. (2010). Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.  
*Protocolo Para El Monitoreo y Seguimiento de La Calidad Del Aire*, 137.
- Meteosim SL. (2021). *Series meteorológicas Meteosim* S.L.  
<https://metdata.meteosim.com/es/>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Manual de operación  
 de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. 287.  
[https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/  
 pdf/contaminacion\\_atmosferica/Protocolo\\_Calidad\\_del\\_Aire\\_-  
 \\_Manual\\_Operación.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Operación.pdf)
- Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A. M., Amato, F., Catacolí, R. A., Rojas, N. Y., &  
 de la Rosa, J. (2018). Chemical composition and source apportionment of PM10  
 at an urban background site in a high–altitude Latin American megacity (Bogota,  
 Colombia). *Environmental Pollution*, 233, 142–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045>
- Rojano, R., Arregocés, H., & Gámez Frías, E. (2021). Changes in ambient particulate  
 matter during the COVID-19 and associations with biomass burning and Sahara  
 dust in northern Colombia. *Heliyon*, 7(12).  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08595>
- Rojas Quevedo, D. P. (2016). *Determinación de las Cargas Ambientales de la  
 Bebida Gaseosa “Colombiana” De 350 ml retornable mediante el Análisis de  
 Ciclo De Vida (ACV)*.  
[http://repository.udistrital.edu.co/bitstreamhttp://repository.udistrital.edu.co/bitstream/1  
 1349/3433/1/QuevedoRojasDianaPatricia2016.pdf](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3433/1/QuevedoRojasDianaPatricia2016.pdf)
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F.  
 (2015). NOAA’s HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system.  
*Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Su, L., Yuan, Z., Fung, J. C. H., & Lau, A. K. H. (2015). A comparison of HYSPLIT  
 backward trajectories generated from two GDAS datasets. *Science of The Total  
 Environment*, 506–507, 527–537.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.11.072>
- Wang, F., Chen, D. S., Cheng, S. Y., Li, J. B., Li, M. J., & Ren, Z. H. (2010).  
 Identification of regional atmospheric PM10 transport pathways using HYSPLIT,  
 MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis. *Environmental Modelling  
 and Software*, 25(8), 927–934. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.02.004>
- Zhao, S., Yu, Y., Qin, D., Yin, D., Dong, L., & He, J. (2019). Analyses of regional  
 pollution and transportation of PM 2.5 and ozone in the city clusters of Sichuan  
 Basin, China. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 374–385.  
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.014>