

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
CONTAMINANTES CRITERIO DEL AIRE EN EL DIA SIN CARRO EN EL
PERIODO 2002-2015 DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, D.C.**

**Iban Darío Sarmiento Sarmiento
Lina María Sierra Páez**

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C.
2019**

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
CONTAMINANTES CRITERIO DEL AIRE EN EL DIA SIN CARRO EN EL
PERIODO 2002-2015 DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, D.C.**

**Iban Darío Sarmiento Sarmiento
Lina María Sierra Páez**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
Ingeniero Ambiental

Director
Ing. Luis Camilo Blanco Becerra
Magister Salud Ambiental

Codirector
Ing. Ronal Jackson Sierra Parada
Magister Geografía

Línea de Investigación: Salud Ambiental

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Ambiental
Bogotá D.C.
2019**

Nota de aceptación:

Firma director
Ing. Luis Camilo Blanco Becerra
Magister Salud Ambiental

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D.C, septiembre de 2019

“Hemos luchado mucho para estudiar y graduarnos,
pero lo irónico de todo esto es que...
hoy empieza la verdadera lucha”
(Fernando Anfus)

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero a Dios por permitirnos cumplir uno de nuestros proyectos de vida.

A nuestras madres Nelly Páez y Evangelina Sarmiento, por brindarnos la oportunidad de estudiar y por sus muchos esfuerzos durante la carrera profesional que hemos realizado.

A nuestras hermanas Dolly Sierra, Diana Sierra y Mónica Rodríguez, quienes por sus consejos nos dieron ánimo para seguir adelante.

Al cuerpo docente de la facultad de ingeniería ambiental de la Universidad Santo Tomas, nuestros más sinceros agradecimientos por contribuir en nuestra formación profesional.

A nuestro director de grado Luis Camilo Blanco y codirector Ronald Jackson Sierra, por ayudar y aportar sus conocimientos para la realización del trabajo de grado.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es analizar el comportamiento de los contaminantes criterio en la ciudad de Bogotá, D.C., en la implementación de la medida del día sin carro durante el periodo de 2002 a 2015, a partir de 5 franjas horarias establecidas, en relación con las variables climatológicas, las condiciones de la tecnología y combustible del parque automotor. Debido a la falta de información se completaron datos faltantes del PM_{10} utilizando el software IBM SPSS Statistics en el periodo comprendido entre los años 2005 a 2012, generando mapas temáticos por medio del programa ArcGis, mientras que los otros contaminantes (SO_2 , NO_2 , CO y O_3) se analizaron de forma anual por medio de gráficas comparativas, donde se encontró que las máximas concentraciones se presentaron en la franja de 6:00 a.m. a 8:00 a.m., posiblemente atribuido al aumento en la circulación del parque automotor y al efecto de la inversión térmica. Así mismo se observó un aumento del PM_{10} y una disminución en las concentraciones de los demás contaminantes criterio analizados.

Palabras claves: día sin carro, contaminantes criterio, variables meteorológicas, tecnología y tipo de combustible.

ABSTRACT

The objective of this project is to analyze the behavior of the pollutants criterion in the city of Bogotá, D.C., in the implementation of the measurement of the day without car during the period from 2002 to 2015, from 5 established slots, in relation to the climatic variables, the conditions of the technology and fuel of the fleet, due to lack of information, missing PM_{10} data was completed using IBM SPSS Statistics software in the period from 2005 to 2012, generating thematic maps through the arcgis programme, while the other contaminants (SO_2 , NO_2 , CO and O_3) were analyzed annually by means of comparative graphs, where it was found that the maximum concentrations were presented in the band from 6:00 a.m. to 8:00, possibly attributed to the increase in the circulation of the fleet and the effect of the thermal investment, likewise an increase of the PM_{10} and a decrease in the concentrations of the other pollutants criterion analyzed was observed.

Keywords: day without car, pollutant criteria, weather variables, technology and fuel type.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo General.....	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1. Contaminantes criterio y variables meteorológicas	3
3.2. Red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Bogotá, D.C., (RMCAB).....	5
3.3. Escenario internacional y nacional	6
3.4. Día sin carro en la ciudad de Bogotá, D.C.	7
3.5. Tecnología vehicular y tipo de combustibles	8
3.6. Método de Interpolación IDW	11
3.7. Imputación de datos y coeficiente de Pearson.....	11
3.8. Objetivos intermedios de las GCA de la OMS.....	12
3.9. Marco normativo	12
3.10. Marco Legal.....	13
4. METODOLOGÍA	15
4.1. Etapa 1. Recopilación de la información	15
4.2. Etapa 2. Procesamiento de la información	16
4.3. Etapa 3. Elaboración de los mapas temáticos de PM₁₀	17
4.4. Etapa 4. Correlación entre los contaminantes criterio y las variables climatológicas	18
4.5. Etapa 5. Análisis de los contaminantes criterio frente a las GCA, resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 en el día sin carro	18
4.6. Etapa 6. Análisis de los informes de la SDA y del parque automotor en el día sin carro	19
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	20
5.1. Estado de la flota vehicular en la ciudad de Bogotá, D.C.	20
5.2. Análisis de las rosas de los vientos.....	24
5.3. Correlación entre los contaminantes criterio y variables climatológicas	25

5.4.	Análisis del contaminante criterio PM10	28
5.5.	Análisis del contaminante criterio O3	37
5.6.	Análisis del contaminante criterio NO2	40
5.7.	Análisis del contaminante criterio SO2	43
5.8.	Análisis del contaminante criterio CO	47
5.9.	Análisis de los informes de la SDA frente a los contaminantes criterio .	49
6.	IMPACTO SOCIAL	54
7.	CONCLUSIONES	55
8.	RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES	57
9.	BIBLIOGRAFÍA	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción y ubicación de las estaciones	6
Tabla 2. Normas de emisión de la UE para vehículos comerciales ligeros Tecnología Euro g/Km	9
Tabla 3. Normas de emisión de la UE para vehículos pesados tecnología Euro g/KWh	9
Tabla 4. Normas de emisión de la UE para vehículos pesados Tecnología EPA gramos por hora de frenado en caballos de fuerza (gr/bhp-hr)	10
Tabla 5. Objetivos intermedios de la OMS	12
Tabla 6. Concentración máxima establecida por las resoluciones y las GCA de la OMS	13
Tabla 7. Normas de calidad de aire en Colombia	13
Tabla 8. Franjas horarias	17
Tabla 9. Tipo de combustible por clase de vehículo inscrito en el RDA	20
Tabla 10. Evolución de la tecnología Euro en los vehículos desde el año 2002 a 2015	23
Tabla 11. Rosas de vientos obtenidos para el periodo analizado	24
Tabla 12. Correlación Precipitación frente a la concentración de contaminantes criterio, año 2013.	26
Tabla 13. Correlación temperatura frente a la concentración de contaminantes criterio, año 2005.	27
Tabla 14. Correlación humedad frente a la concentración de contaminantes criterio, año 2002.	28
Tabla 15. Datos validos por estación y por año para PM10	29
Tabla 16. Enumeración de las localidades de Bogotá, D.C., en los mapas temáticos	30
Tabla 17. Efectos en la salud por exposición a PM10	36
Tabla 18. Efectos en la salud por exposición a O3	39
Tabla 19. Efectos en la salud por exposición a NO2	42
Tabla 20. Efectos en la salud por exposición a SO2	46
Tabla 21. Efectos en la salud por exposición a CO	49
Tabla 22. Números de vehículos revisados por la SDA.	52

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Proceso metodológico	15
Ilustración 2. Concentración promedio de PM10 en el día sin carro, franja 1, año 2012.....	31
Ilustración 3. Concentración promedio de PM10 en el día sin carro, franja 2, año 2007.....	31
Ilustración 4. Concentración promedio de PM10 en el día sin carro, franja 4, año 2008.....	33
Ilustración 5. Concentración promedio de PM10 en el día sin carro, franja 5, año 2007.....	33

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Parque automotor del SITM para el periodo 2002 a 2015	22
Gráfica 2. PM10 en un tiempo de exposición 24 hrs, año 2008 (franja 2)	34
Gráfica 3. PM10 en un tiempo de exposición anual, año 2008 (franja 4)	34
Gráfica 4. PM10 en un tiempo de exposición 24 hrs, año 2006 (franja 3).	35
Gráfica 5. PM10 en un tiempo de exposición anual, año 2007 (franja 1)	35
Gráfica 6. Concentración de O3 en un tiempo de exposición 8 hrs, año 2012	38
Gráfica 7. Concentración de NO2 en una exposición de 1 hora, año 2005	41
Gráfica 8. Concentración de NO2 en una exposición anual, año 2013	42
Gráfica 9. Concentración máxima de SO2 en un tiempo de exposición 1 y 3 hrs, año 2009	44
Gráfica 10. Concentración máxima de SO2 en un tiempo de exposición 24 hrs, año 2002	45
Gráfica 11. Concentración promedio de CO en un tiempo de exposición 8 hrs, año 2004	48
Gráfica 12. Concentración máxima de CO en un tiempo de exposición 1 hr, año 2004	48
Gráfica 13. Concentración de PM10 reportado por la SDA frente a datos del estudio en tiempo de exposición	50
Gráfica 14. Concentración de O3 reportado por la SDA frente a datos del estudio en un tiempo de exposición de 8 hrs	51
Gráfica 15. Concentración de NO2 reportado por la SDA frente a datos del exposición anual	52
Gráfica 16. Concentración promedio anual de SO2 reportado por la SDA vs datos del estudio en un tiempo de exposición de 24 horas	53
Gráfica 17. Concentración promedio anual de CO reportado por la SDA vs datos del estudio en un tiempo de exposición de 8 horas	53

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años en la ciudad de Bogotá, D.C., se ha presentado un crecimiento poblacional, por lo que se requiere de un sistema de transporte público, el cual, junto con las motos, facilitan la movilización de los ciudadanos. Así mismo, los vehículos de carga contribuyen al desarrollo productivo y económico, ya que permiten la mejora en la planeación y gestión de la ciudad [1,2]. Sin embargo, su implementación genera impactos ambientales negativos por las emisiones de fuentes móviles, constituidas por los contaminantes criterio, siendo ellos el material particulado $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y ozono troposférico (O_3), que corresponden al 78%, en comparación de las fuentes fijas con un 22%, según datos para el año 2012 en Bogotá, D.C., [3], y dependiendo del tipo de tecnología EURO o EPA, el combustible utilizado en los vehículos y las condiciones meteorológicas, tendrán una afectación directa o indirecta en las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Por la exposición prolongada a estos contaminantes criterio se aumenta el riesgo de padecer una enfermedad cardiovascular, accidente cerebrovascular o cáncer, donde se les atribuyen cerca de siete millones de muertes cada año según la Organización Mundial de la Salud (OMS) [4]. Con el objetivo de reducir los niveles de material particulado, gases y vapores en Bogotá, D.C., para el año 2000 empezó a regir el decreto 1098, el cual prohíbe la circulación de vehículos automotores en la ciudad el primer jueves del mes de febrero de todos los años siguientes a éste [5].

Esta investigación se realizó con el objetivo de analizar el comportamiento de los contaminantes criterio del aire durante la medida del día sin carro en el periodo de 2002 a 2015 y su incidencia en la salud de la población; para su desarrollo se recopiló información de la polución atmosférica, variables meteorológicas y la flota vehicular de la ciudad, con el propósito de seleccionar aquellos datos que se ajustaran al objetivo del estudio para cada una de las franjas horarias establecidas se procesó la información a través del software IBM SPSS Statistics.

En la siguiente etapa únicamente se realizaron mapas temáticos de la dispersión de las concentraciones de PM_{10} . Por otra parte, se elaboraron gráficas comparativas con los valores obtenidos y lo establecido por las Guías de Calidad del Aire de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 para el material particulado y los gases atmosféricos. Posteriormente se llevaron a cabo correlaciones entre los contaminantes criterio y variables meteorológicas, además se realizó un análisis de los informes emitidos por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) en el día sin carro y del parque automotor. Este trabajo investigativo permite establecer si la medida implementada disminuye o aumenta las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, estableciendo un punto de partida para próximas investigaciones a realizarse.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento de los contaminantes criterio del aire en la ciudad de Bogotá, D.C., con relación a la implementación de la medida del día sin carro durante el periodo de 2002 a 2015 y su incidencia en la salud de la población.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar el comportamiento de los contaminantes criterio del aire en los días sin carro durante el periodo de 2002 a 2015 en la ciudad de Bogotá, D.C., por medio de cinco franjas horarias.
- Establecer las condiciones de tecnología y combustible de los vehículos de transporte público, que afectan la calidad del aire del día sin carro durante el periodo de 2002 a 2015 en la ciudad de Bogotá, D.C., así mismo su relación con los factores ambientales y fenómenos meteorológicos.
- Determinar si la medida del día sin carro implementada durante los años 2002 a 2015 ha conllevado a beneficios en la calidad del aire en la ciudad de Bogotá, D.C., por medio de mapas temáticos utilizando el software ArcGis.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Contaminantes criterio y variables meteorológicas

Los contaminantes criterio son aquellas sustancias que influyen directamente de forma peligrosa en la salud de la población, debido a que se emiten al ambiente en grandes volúmenes por fuentes antropogénicas, son medidos de forma periódica por redes de monitoreo y supervisados por diferentes normas de calidad del aire [6]. Las emisiones atmosféricas generadas por fuentes móviles y fuentes fijas son transformadas por factores ambientales que afectan su composición, como lo son, humedad relativa, precipitación, temperatura, dirección y velocidad del viento [7].

Entre el periodo de 1971 a 1976 la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (EPA), propuso los Estándares de Calidad del Aire en la Ley de Aire limpio; en el año de 1990 se determinaron cinco parámetros, considerándolos como contaminantes criterio, los cuales fueron PM_{10} , SO_2 , CO , NO_2 y O_3 [8, 9,10], esto con el fin de proporcionar protección a la población, contra efectos adversos a la salud por la exposición de contaminantes en la atmósfera [11].

- **Material particulado 10 micras (PM_{10}):** el material particulado inferior a 10 micras, es el conjunto de pequeñas porciones de material sólido o líquido, que permanecen suspendidas individualmente en la mezcla de gases de la atmósfera, con un tiempo de retención de minutos a horas en el ambiente, estas partículas provienen de las emisiones vehiculares, resuspensión del polvo en el suelo y de las fuentes industriales. Los efectos en la salud dependen de su tamaño, puesto que a menor tamaño mayor es la penetración al organismo, pueden ingresar por vía respiratoria a los pulmones a causa de una exposición prolongada [12,13].
- **Dióxido de azufre (SO_2):** es un gas incoloro altamente soluble en el agua, que se genera principalmente por la quema de combustibles fósiles, ya que por su estructura contiene altos niveles de azufre, que representan un tercio de las emisiones contaminantes y posee una vida media de dos a cuatro días en la atmósfera. Cerca del 99% del SO_2 proviene de fuentes antropogénicas, además de ser emitido por el escape de los vehículos producto de la combustión en el motor, también puede ser producido por la actividad geotérmica de la tierra. Al ser muy soluble se absorbe fácilmente en la parte superior del tracto respiratorio, generando enfermedades en los pulmones y favoreciendo el aumento de enfermedades cardiovasculares [14, 15, 16].
- **Monóxido de carbono (CO):** el monóxido de carbono no es percibido por los seres vivos, se origina por la combustión incompleta que ocurre cuando no existe suficiente oxígeno para completar el proceso de oxidación del carbono, el cual está presente en los combustibles fósiles como la gasolina o diésel,

los cuales son liberados por el tubo de escape de los vehículos, posee un tiempo medio de resistencia de uno a dos meses en la atmósfera, la población más expuesta a este gas son aquellos que poseen enfermedades del corazón [17, 18].

- **Dióxido de nitrógeno (NO_2):** es un compuesto químico en estado gaseoso que se obtiene por la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno atmosférico, los cuales en presencia de altas temperaturas durante la combustión, se enfrían y posteriormente se oxidan, dando lugar al NO_2 , con un tiempo de resistencia de días. El origen principal de este contaminante es provocado por la combustión interna del diésel en los motores de los vehículos, igualmente se produce en la naturaleza por procesos biológicos del suelo y por la oxidación de forma natural del monóxido de nitrógeno. La exposición prolongada a grandes concentraciones de NO_2 puede provocar inflamación y obstrucción en el tracto respiratorio [19, 20, 21].
- **Ozono Troposférico (O_3):** es un oxidante fotoquímico formado por la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y CO , ambos en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales son emitidos por fuentes fijas y móviles, reaccionan químicamente en presencia de la luz solar dando origen al O_3 . Las concentraciones más altas se dan en los días soleados donde la cantidad de luz solar es mayor. La exposición a este contaminante afecta principalmente a niños, adultos mayores, personas con asma y aquellas que están activas al aire libre; provocando dolor en el pecho, tos, irritación de la garganta e inflamación de las vías respiratorias [22, 23].
- **Temperatura (T):** la temperatura atmosférica representa el nivel de acumulación de energía calorífica en la atmósfera en un lugar y tiempo determinado, los patrones bruscos de esta variable climatológica pueden afectar la dispersión de los contaminantes criterio en el medio ambiente [24].
- **Humedad relativa (H.R):** es la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire, con respecto a la cantidad máxima que puede contener en las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica, es la forma principal de expresar la humedad existente en el ambiente [25,26].
- **Precipitación (PR):** la precipitación se define como la cantidad de gotas o hidrometeoros que caen sobre la superficie terrestre, se presenta en estado líquido y sólido. Es un proceso meteorológico muy importante de la hidrología, de la misma manera que la evaporación y las aguas superficiales, debido a que juntos interactúan con la atmósfera para formar el ciclo hidrológico del agua [27].

- **Dirección y velocidad del viento (D.V, V.V):** el viento se desplaza en un tiempo y espacio determinado a lo largo de la superficie terrestre, a esto se le conoce como la velocidad del viento, mientras que su dirección se caracteriza por ser de forma horizontal. La dispersión y el transporte de los contaminantes criterio en la atmósfera, depende del viento que tiene un papel importante para su transformación [28, 29].

3.2. Red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Bogotá, D.C., (RMCAB)

- **Historia de la RMCAB**

En el año 1967 surgió el primer intento de monitorear la calidad del aire en Colombia, esto inició cuando el Ministerio de Salud vinculó al país a la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Calidad del Aire (Red Panaire), siendo una iniciativa de la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Se instalaron en Bogotá, D.C., 5 estaciones, las cuales tomaron muestras diarias de partículas totales en suspensión (PTS), SO_2 y datos mensuales de polvo sedimentable [1]. La RMCAB se creó a partir de un estudio realizado por la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA), junto con la colaboración de la Secretaría de Salud del Distrito durante los años 1991 y 1992, el cual estableció los parámetros que deberían ser evaluados mediante 5 estaciones ubicadas en el centro de la ciudad [30].

- **Información de la RMCAB**

La RMCAB consiste en un conjunto de dispositivos de medición, que en forma sistemática toman registros de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas, con el fin de evaluar el cumplimiento de los límites máximos permisibles de calidad del aire en la ciudad y a partir de esto determinar cómo es su influencia en la salud de la población. La red inició operaciones a partir del año 1997, y, está formada en la actualidad por 13 estaciones que se encuentran distribuidas dentro de la ciudad [1, 2, 3]. La SDA es la entidad encargada de procesar y analizar la información obtenida de estas estaciones y posteriormente generar informes mensuales y anuales, con el propósito de brindar información del estado de la calidad del aire de la ciudad y que sirva como insumo para la creación de nuevas políticas gubernamentales [31].

La tabla 1 muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo distribuidas en la ciudad, las variables meteorológicas y los contaminantes criterio sobre los que se hace control, además las características que predominan en las zonas.

Tabla 1. Descripción y ubicación de las estaciones

Zona	Estación	Contaminantes criterio	Variables meteorológicas	Características
Norte	Guaymaral	PM_{10} , O_3 , NO_2	V.V, D.V, T, H.R, PR	Zona residencial Baja densidad poblacional Alto tráfico vehicular
	Suba	PM_{10} , O_3 , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, T, PR	
	Usaquén	PM_{10} , O_3 , CO .	V.V, D.V, T,H.R,	
Occidente	Fontibón	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 .	V.V, D.V, T, PR	Zona mixta (Residencial y comercial) Alto tráfico vehicular
	Las Ferias	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, T, H.R, PR	
Sur	Carvajal Sevillana	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 .	V.V, D.V, T, PR	Zona mixta (Residencial y comercial) Alto tráfico vehicular
	Tunal	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, T, H.R, PR	
	Kennedy	PM_{10} , CO , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, T, H.R, PR	
	Cazucá	PM_{10} , O_3 , CO .	V.V, D.V, T, PR	
	San Cristóbal	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 .	V.V, D.V, T, H.R, PR	
Centro	Parque Simón Bolívar	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, T, H.R, PR	Zona comercial, industrial e institucional Alto tráfico vehicular
	Chico Lago	NO_2 , CO , O_3	V.V, D.V, PR	
	Puente Aranda	PM_{10} , O_3 , CO , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, T, PR	
	MAVDT	O_3 , CO , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, PR	
	Cade Energía	PM_{10} , SO_2 , NO_2	V.V, D.V, PR	Zona mixta (Residencial y comercial) Alto tráfico vehicular

Fuente. Autores

3.3. Escenario internacional y nacional

A nivel internacional se han realizado diferentes estudios descriptivos sobre la restricción vehicular como medida de política ambiental, con el propósito de disminuir las concentraciones de los contaminantes criterio. Por ejemplo en Nápoles y al norte de Milán, ciudades ubicadas en Italia, se demostró que las concentraciones de PM_{10} no disminuyeron, con las propuestas de limitación de los viajes en intervalos de tiempo, sobrepasando los límites permisibles propuestos por las Guías de Calidad del Aire de la OMS, en donde se concluyó que no existió una mejora en la calidad del aire en diferentes zonas con una elevada movilidad de vehículos, aumentando las enfermedades cardiovasculares y respiratorias en individuos expuestos a ambientes extramurales en los años 2010 y 2011 [32,33]. Por otra parte, China, al ser una de las potencias económicas, posee los niveles más altos de emisiones por fuentes móviles y puntuales, generando efectos adversos sobre la salud humana. Desde al año 1990 se han implementado

programas para el mantenimiento de los vehículos y el cambio del combustible; no obstante, se proyecta un crecimiento total del número de vehículos de transporte público y privado de 400 a 500 millones para el año 2030 con tecnología Euro VI; una evaluación sobre un modelo de dispersión de los contaminantes NO_x y $PM_{2.5}$, para los años 2002 hasta 2030 mostró una disminución de dichas partículas a partir de las medidas impuestas por el gobierno chino [34]. Finalmente, para la ciudad de Pekín, la política sobre la restricción vehicular no produce una disminución de las emisiones de CO_2 . Sin embargo, otros contaminantes como CO y $PM_{2.5}$, se redujeron para el periodo comprendido entre 1998 y 2010 según un estudio realizado [35].

Por otro lado, en la Ciudad de México, en el año de 1989, se estableció la medida ambiental con el nombre Hoy No Circula (HNC). Según varios estudios descriptivos y modelos teóricos de agrupación realizados para el análisis de la política implementada, con el objetivo de disminuir las emisiones por fuentes móviles, se evidenció, una reducción de PM_{10} a corto plazo, en relación con un aumento en el número de vehículos comprados y la composición de los automóviles. Sin embargo, se presentó un incremento significativamente notable en las emisiones de NO_2 , NO_x y O_3 [36].

En América Latina, una de las ciudades más importante de Brasil es Sao Paulo, y según resultados obtenidos de 22 estaciones de monitoreo de calidad del aire durante el periodo de 1996 a 2009, en donde se aplicó el proyecto de restricción vehicular de manera obligatoria a partir del año 1995, se evidenció una reducción anual de SO_2 , PM_{10} y CO del 80%. Se presentó igualmente una disminución importante de SO_2 producido por el combustible utilizado en automóviles de carga pesada y liviana [37].

En la capital de Colombia, Bogotá, D.C., para el día jueves 24 de febrero del 2000 se llevó a cabo la prueba piloto de la política ambiental “sin mi carro en Bogotá, D.C.,” y según un estudio realizado en el mes de octubre para ese año, dirigido por la Oficina de Estudios Económicos de la Secretaria de Hacienda, arrojó una reducción del 23% de material particulado, en donde las localidades de Kennedy, Suba, Tunjuelito, Fontibón y Engativá, se caracterizaron por presentar las menores concentraciones durante la jornada [38,39].

3.4. Día sin carro en la ciudad de Bogotá, D.C.

Estudios realizados por el DAMA (Departamento Administrativo del Medio ambiente), actualmente conocida como SDA, evidenciaron que para el gobierno distrital del año 2000 la contaminación atmosférica, era uno de los principales problemas para la salud pública y el medio ambiente. Por tal motivo, la política ambiental de la ciudad de Bogotá, D.C., para el nuevo milenio se centró en la

búsqueda de alternativas para reducir estas emisiones y se creó el proyecto “sin mi carro en Bogotá, D.C.,” actualmente conocido como el día sin carro [40, 41], estipulado por el decreto 1098, el cual tenía como propósito prohibir la circulación de vehículos automotores en Bogotá, D.C., el primer jueves del mes de febrero a partir del 2001, debido a que se encontraron estudios en los cuales año a año aumentaba la dependencia y uso del automóvil, conllevando a la disminución paulatina del uso de otras alternativas de transporte, como lo es la bicicleta y sistema de transporte público [41].

3.5. Tecnología vehicular y tipo de combustibles

En la resolución 2604 de 2009 de los Ministerios de Minas y Energía y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se establecieron los límites máximos permisibles de emisión para el transporte de pasajeros y motocarros que se relacionan con la prestación de un servicio público, a partir de las pruebas realizadas por Estados Unidos (EPA) y Europa (Euro), para el control de emisiones en los motores que utilizan diésel, gasolina y gas, cabe destacar que el tipo de tecnología vehicular seleccionada por parte de las empresas dependerá de su lugar de procedencia, el cual deberá cumplir con los estándares determinados por la norma anteriormente mencionada [42].

- **Características de la tecnología Euro y EPA en los vehículos**

La tecnología Euro surge en el año 1992, la cual cuenta con los estándares de concentración máxima que puede ser emitida por automotores para contaminantes como **CO**, **PM₁₀** e Hidrocarburos. Para los vehículos ligeros las etapas de la tecnología son (Euro 1 – 6), mientras que para vehículos pesados son expresados en números romanos (Euro I – VI) [43, 44, 45]. Al surgir la tecnología Euro se dictaron medidas para la reducción de emisiones de la flota vehicular. Para esto se implementó un catalizador en el tramo intermedio del tubo de escape, cuya función era reducir y transformar los gases de combustión utilizando un proceso químico llamado reducción-oxidación. Las tecnologías (Euro II – IV) tenían el propósito de establecer medidas aún más estrictas que la anterior, mediante la disminución de los tamaños de los motores o añadiendo más marchas a las cajas de transmisión. En el año 2005 apareció la tecnología Euro V, implementándose un filtro antipartículas en los vehículos diésel, denominado Diésel Particle Filter (DPF), para eliminar la impureza de este combustible [46].

La última categoría es el Euro VI para vehículos con un alto cilindraje, los cuales requieren de una gran cantidad de combustible para su movilización produciendo altas emisiones de contaminantes atmosféricos al ambiente. En este tipo de tecnología se utilizó un compuesto líquido llamado AdBlue, el cual, se administra en pequeñas dosis en los gases de combustión, produciendo una reacción química a altas temperaturas que genera amoníaco, el cual se descompone en moléculas de

óxidos de nitrógeno, nitrógeno molecular y agua, siendo inofensivos para el medio ambiente [47,48]. En las tablas 2 y 3, se presenta el tipo de tecnología, el año en que entró en operación y las concentraciones máximas permitidas para los vehículos ligeros y pesados con gasolina y diésel.

Tabla 2. Normas de emisión de la UE para vehículos comerciales ligeros Tecnología Euro g/Km

TECNOLOGÍA (año de implementación)	CO		HC		HC+NOX		NOX		PM	
	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel	Gasolina	Diésel
EURO 1 (1994)	2.72	2.72	-	-	0.97	0.97	-	-	-	0.14
EURO 2	2.2	1.0	-	-	0.5	0.7	-	-	-	0.08
EURO 3	2.3	0.64	0.2	-	0.5	0.56	0.15	0.5	-	0.05
EURO 4	1.0	0.5	0.1	-	-	0.3	0.08	0.25	-	0.025
EURO 5	1.0	0.5	0.1	-	-	0.23	0.06	0.18	0.005	0.005
EURO 6	1.0	0.5	0.1	-	-	0.17	0.06	0.08	0.005	0.005

Fuente. [43,44]

Tabla 3. Normas de emisión de la UE para vehículos pesados tecnología Euro g/KWh

TECNOLOGÍA (año de implementación)	CO	HC	NOX	PM
EURO I (1993)	4.5	1.1	8.0	0.36
EURO II (1996)	4.0	1.1	7.0	0.15
EURO III (2000)	2.1	0.66	5.0	0.10
EURO IV (2005)	1.5	0.46	3.5	0.02
EURO V (2008)	1.5	0.46	2.0	0.02
EURO VI (2013)	1.5	0.13	0.4	0.01

Fuente. [43,44]

A partir de la Ley de Aire Limpio en el año 1971 en Estados Unidos se estableció una meta de reducir el 90% de las emisiones, generadas por vehículos a gasolina posterior a 1975, para cumplir con esto se instaló un dispositivo de recirculación y un sistema que controlaba la evaporación de gases en el tanque, en el año 1975 se incorporó un convertidor catalítico, desde este año los límites permisibles de contaminantes criterio se fueron restringiendo paulatinamente por medio de un sistema de control de emisiones de la EPA, posteriormente los vehículos en el año de 1998 contaban con un control eléctrico, un inyector unitario electrónico y uno variable, generando unas mejoras internas durante el proceso de combustión, en el 2004 se realizaron unas modificaciones, en donde se introdujo un nuevo inyector unitario con una capacidad de presión de 1.700 a 1.900 bar, una válvula de sistema de recirculación de gases (EGR) con enfriador y se realizó un cambio al pistón en el motor, ya para el año 2007 se calibró y optimizó la válvula EGR, además se aumentó la presión en el inyector unitario; finalmente se encuentra en vigencia la norma EPA 10 del año 2010, donde el motor funciona con una presión superior a 2.000 bar [49,50] ver tabla 4.

Tabla 4. Normas de emisión de la UE para vehículos pesados Tecnología EPA gramos por hora de frenado en caballos de fuerza (gr/bhp-hr)

TECNOLOGIA (año de implementación)	CO	HC	NOX	PM
EPA 94 (1994)	15.5	1.3	5	0.1
EPA 98 (1998)	15.5	1.3	4	0.1
EPA 04 (2004)	15.5	1.3	2.5	0.1
EPA 07 (2007)	15.5	1.3	1.2	0.01
EPA 10(2010)	15.5	1.3	0.2	0.01

Fuente. [42,43]

- **Diésel:** según un estudio de calidad de los combustibles en Colombia realizado por Ecopetrol, para el año de 1990 se contaba con una concentración de 5.000 partes por millón (ppm) de azufre, este compuesto se ha reducido con el paso del tiempo, de tal manera que en el año 2001 se dividió en dos tipos, el extra con un contenido de 1.200 ppm distribuido en la ciudad de Bogotá, D.C., debido a la implementación del Sistema de Transporte Masivo, mientras que el diésel corriente que era comercializado en el resto del país tenía una concentración de 3.000 ppm. A partir del año 2012 a nivel nacional los dos tipos de diésel poseían una concentración de 50 ppm de azufre [51,52].
- **Gasolina:** a partir de la eliminación del plomo como componente de la gasolina en el año 1990 se ha producido una mejora en la reducción de compuestos aromáticos. Para el año 2005, se agregó un 10% de etanol y, para el 2010, se proyectó una reducción del contenido de azufre de 900 ppm a menos de 300 ppm; además, el contenido de hidrocarburos aromáticos en la gasolina regular fue de un 28% y para la gasolina extra de 35% máximo en volumen. Colombia es uno de los mejores países del mundo en la calidad de este combustible, ya que la gasolina regular que se distribuye se encuentra con un 20% y la gasolina Premium con 22% de contenido de compuestos aromáticos, el benceno se presenta en la de tipo extra y en la regular, con un valor de 0.7% [52].
- **Otros combustibles:** desde el año 1970 la evolución de otros tipos de combustibles han tenido un constante crecimiento a nivel nacional, como por ejemplo el Gas Natural vehicular (GNV), cuya composición es: Metano (94.8%) que es comprimido para aumentar su densidad energética y así poder llegar a ser igual de eficiente a los demás combustibles fósiles, etano (2.9%), propano (0.8%), butano (0.2%) y NO_2 (1.2%), su implementación produce cerca del 0.0004 g/kWh de material particulado y cerca de 0.02 g/kWh de NO_x [53, 54]. Otro de los combustibles que se están utilizando en la actualidad es el etanol, producto de la fermentación de azúcares, el cual se puede usar solo o mezclado con gasolina [53].

3.6. Método de Interpolación IDW

La interpolación se basa en la autocorrelación espacial, en donde se reconoce que los puntos más cercanos tienen una mayor similitud a comparación de los puntos lejanos, estimando valores de diferentes variables en lugares que no se posee información por medio de mediciones en los lugares con la misma ubicación geográfica [55]. El método de interpolación IDW, tiene un enfoque determinista debido a que se estima un valor para cada celda de la cuadrícula solamente utilizando las características físicas de las muestras, para ello se calcula un promedio ponderado en función de la distancia de los puntos en relación a un vecino más cercano, ya que tendrá más influencia [56].

3.7. Imputación de datos y coeficiente de Pearson

La imputación consiste en reemplazar datos, cuando la información se encuentra incompleta (valores perdidos) o por la presencia de números que no corresponden al comportamiento esperado, la elección del método de imputación dependerá de la conducta de los datos faltantes, para esto se debe identificar el estado del patrón de la muestra analizada, por medio de tres mecanismos los cuales son: perdidos completamente al azar, representa la ausencia de la información que no es producida por ninguna de las variables presentes en la muestra de estudio, perdidos al azar, en el cual la ausencia de datos se relaciona con las variables existentes en la muestra y datos perdidos no al azar, en donde los valores ausentes dependen de la propia variable analizada [57, 58, 59].

El coeficiente de Pearson mide el grado de relación de dos variables cuantitativas aleatorias que poseen una distribución normal, para su estimación necesariamente las variables deben ser escalares e independientes indicando solo una observación para cada uno de los datos analizados, su fórmula se define en términos de la covarianza que representa el cambio de las dos variables conjuntamente [60], a continuación se muestra la ecuación para su realización:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

El coeficiente lineal r posee las siguientes características:

- $r=0$, no puede establecerse ningún sentido de correlación [60].
- $r=1$ Correlación positiva perfecta, tiene una determinación absoluta entre las dos variables (en sentido directo), es decir existe una relación lineal perfecta con pendiente positiva [59].
- $r>0$ Correlación positiva, las dos variables se correlacionan en sentido directo, a valores altos de una le corresponden valores altos de la otra e igualmente con los valores bajos [60].

- $r < 0$ Correlación negativa, las dos variables se correlacionan en sentido inverso, a valores altos de una de ellas le pertenecen valores bajos de la otra y viceversa [60].
- $r = -1$ correlación negativa perfecta, posee una determinación absoluta entre las dos variables en sentido inverso, existe una relación funcional perfecta entre ambas con pendiente negativa [60].

3.8. Objetivos intermedios de las GCA de la OMS

El propósito de las Guías de Calidad del Aire de la OMS (GCA) es ofrecer datos acerca de los efectos en la salud por la contaminación atmosférica, ésta información permite la creación y formulación de políticas públicas para reducir las concentraciones de los contaminantes criterio, por esta razón se determinaron unos objetivos intermedios para cada uno por la OMS, los cuales se presentan en la tabla 5:

Tabla 5. Objetivos intermedios de la OMS

Contaminante	Tiempo de exposición	Objetivo intermedio-1 (OI-1)		Objetivo intermedio-2 (OI-2)		Objetivo intermedio-3 (OI-3)		Guía de calidad del aire (GCA)	
		Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fundamento	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fundamento	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fundamento	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fundamento
PM10	Media anual	70	El riesgo de mortalidad a largo plazo es alrededor de un 15%	50	Se reduce el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente en comparación con OI-1	30	Se reduce el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente en comparación con OI-1	20	Este es el nivel más bajo con el cual se ha demostrado una reducción en la mortalidad
	24 horas	150	Existe un aumento de alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA	100	Se presenta un aumento de alrededor del 2,5% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA	75	Existe un aumento de alrededor del 1,2% de la mortalidad a corto plazo sobre el valor de las GCA	50	Con base a los niveles establecidos de material particulado de 24 horas y anuales
O3	Máxima diaria de 8 horas	160	No genera una protección adecuada de la salud pública, incremento estimado de un 3-5% de la mortalidad diaria	-	-	-	-	100	Genera una protección adecuada de la salud pública, incremento estimado de un 1-2% de la mortalidad diaria
SO2	24 horas	125	-	50	Conduciría a mejoras significativas	-	-	20	-
NO2	Media anual	-	-	-	-	-	-	40	Genera una protección adecuada de la salud pública, sin embargo se debería utilizar un valor guía más bajo
	Media de 1 hora	-	-	-	-	-	-	200	

Fuente. [61]

3.9. Marco normativo

En la tabla 6 se identifican las concentraciones máximas establecidas para los gases y partículas suspendidas en el aire, según las resoluciones 610 de 2010 y 2554 del 2017 emitidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y las Guías de calidad del aire de la OMS del año 2006 para la protección de la salud pública a nivel mundial.

Tabla 6. Concentración máxima establecida por las resoluciones y las GCA de la OMS

Contaminante	Resolución 610 de 2010		Resolución 2254 de 2017		Norma OMS	
	Nivel máximo permisible (µg/m3)	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible (µg/m3)	Tiempo de exposición	Nivel máximo permisible (µg/m3)	Tiempo de exposición
PM_{10}	50	Anual	50	Anual	20	Anual
	100	24 horas	100	24 horas	50	24 horas
SO_2	250	24 Horas	50	24 horas	20	24 horas
	750	3 horas	100	1 hora	500	10 min
NO_2	100	Anual	60	Anual	40	Anual
	200	1 hora	200	1 hora	200	1 hora
O_3	80	8 horas	100	8 horas	100	8 horas
CO	10000	8 horas	5000	8 horas	-	-
	40000	1 hora	35000	1 hora	-	-

Fuente. [61, 62, 63]

3.10. Marco Legal

Las normas de calidad del aire estipuladas a nivel nacional pertinentes para el control de emisiones por fuentes móviles se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Normas de calidad de aire en Colombia

Norma	Descripción
Constitución política de 1991	Se establece en el artículo 79 que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano
Ley 9 de 1979	Se dictan medidas sanitarias para preservar, restaurar u mejorar las condiciones necesarias en lo que se relaciona a la salud humana
Ley 99 de 1993	Se creó del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, además de organiza el sector encargado del medio ambiente.
Ley 1205 de 2008	Se establece una mejora de la calidad de vida a través de la calidad del diésel y se dictan otras disposiciones.
Decreto-Ley 2811 de 1974	Se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
Ley 769 de 2002	Por la cual se rige la movilización de ciclistas
Ley 1811 de 2016,	Por la cual se otorgan incentivos para promover el uso de la bicicleta en el territorio nacional y se modifica el Código Nacional de Tránsito.
Decreto 1098 de 2000	Por el cual se reglamenta la medida del día sin carro el primer jueves del mes de febrero en la ciudad de Bogotá, D.C.
Decreto 02 de 1982	Reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979 y decreto 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas
Decreto 948 de 1995	Se establece las normas, principios, mecanismos de prevención, control y atención para la protección atmosférica.
Decreto 2107 de 1995	Por medio del cual se modifica parcialmente el decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.
Decreto 98 de 2011	Determina el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá, D.C..

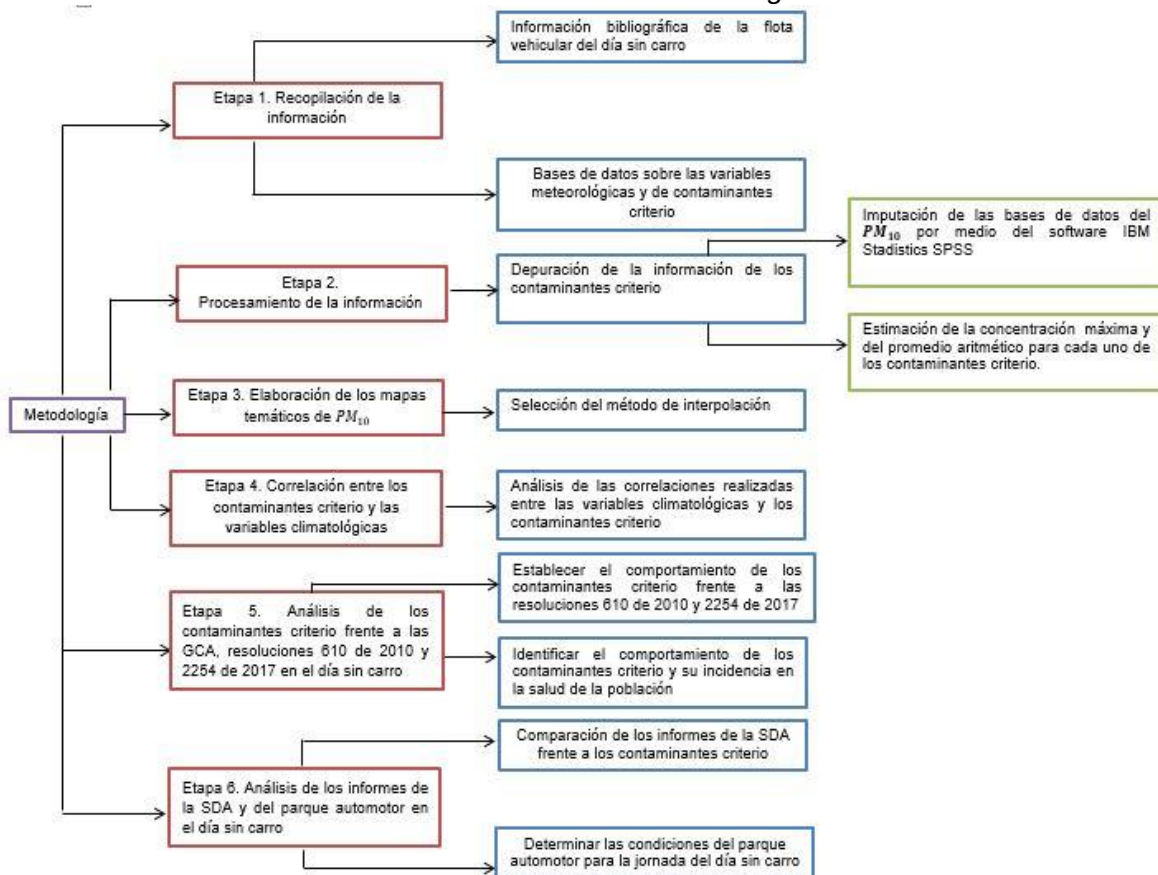
Decreto 979 de 2006	Se modifica los artículos 7,10,93,94 y 108 del Decreto 948 de 1995
Decreto 1076 de 2015	Decreto único complementario del sector y desarrollo sostenible, el cual reúne todas las normas ambientales expedidas por el gobierno nacional.
Resolución 160 de 1996	Se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por las fuentes móviles con motor a gasolina y diésel
Resolución 2604 de 2009	Establece los combustibles limpios teniendo en cuenta sus componentes, además de los límites máximos de emisión permisibles para vehículos de transporte público.
Resolución 650 de 2010	Se establece el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.
Resolución 651 de 2010	Se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire - SISAIRE
Resolución 2154 de 2010	Se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010.
Acuerdo 23 de 1999	Se ordena la evaluación de las emisiones de gases y otros contaminantes emitidos por vehículos automotores con el fin de proteger el aire en el Distrito Capital
Acuerdo 367 de 2009	Establece que la información de las Estaciones de la RMCAB, será permanente, pública y masiva, y deberá ser publicada, máximo dentro de las 12 horas siguientes a la recepción de los datos.

Fuente. [64]

4. METODOLOGÍA

Para la ejecución de esta investigación se utilizó una metodología descriptiva correlacional, ya que se identificó el comportamiento de los contaminantes criterio en el día sin carro en Bogotá, D.C., realizando un análisis de la correlación existente con las condiciones meteorológicas, la ilustración 1 muestra la metodología que se llevó acabo para la ejecución del proyecto, para ello se establecieron 6 etapas.

Ilustración 1. Proceso metodológico



Fuente. Autores

4.1. Etapa 1. Recopilación de la información

- Información bibliográfica de la flota vehicular del día sin carro**

Se realizó una búsqueda de información bibliográfica acerca del parque vehicular automotor de la ciudad de Bogotá, D.C., para el periodo de estudio, obteniendo datos año a año del combustible utilizado y el tipo de servicio de los vehículos inscritos en el Registro Distrital Automotor; el número de flota vehicular fue consultada en los “informes de movilidad en cifras” de la Secretaria de Movilidad,

“indicadores de movilidad sostenible” de la Secretaria Distrital de Ambiente e “informes del reporte anual de movilidad” elaborados por la Cámara de Comercio y la Universidad de los Andes [65, 66,67]. A partir de la recolección de información, se analizó la relación existente entre crecimiento vehicular frente a los niveles de concentración de los contaminantes criterio en el día sin carro.

- **Bases de datos de las variables meteorológicas y de contaminantes criterio**

Las bases de datos de los registros históricos de los contaminantes criterio fueron suministrados por la RMCAB, las cuales correspondían a archivos de MSEXcel® con el año de registro y la información horaria de cada una de las estaciones de monitoreo para los días específicos del día sin carro. Para emprender el análisis, se organizó el archivo Excel de acuerdo a cada uno de los contaminantes, las hojas contenían las estaciones con las concentraciones medidas de forma anual desde el año 2002 hasta el 2015.

Los datos de las variables meteorológicas fueron proporcionados por el IDEAM en un conjunto de archivos RAR con temperatura, humedad relativa y precipitación para todas las estaciones climatológicas establecidas para la ciudad, de esta manera se procedió a estructurar el archivo de Excel, especificando el día sin carro para el periodo investigado de cada una de las variables; se solicitó a la RMCAB información sobre datos climatológicos, incluyendo dirección y velocidad del viento, con el propósito de presentar las rosas de vientos de la semana donde se llevó a cabo el día sin carro y de esta manera identificar las condiciones atmosféricas para el periodo de estudio.

4.2. Etapa 2. Procesamiento de la información

- **Depuración de la información de los contaminantes criterio**

Para comenzar la segunda etapa, se realizó la conversión de unidades de tal manera que los contaminantes analizados se manejaran en la misma unidad de medición microgramos sobre metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) debido a que los gases atmosféricos SO_2 , NO_2 y O_3 se encontraban en partes por billón (ppb) y el CO estaba en por partes de millón (ppm) en el archivo de Excel organizado anteriormente, posteriormente con ayuda del software IBM SPSS Statistics se desarrolló el análisis de datos perdidos en las 24 horas del día sin carro para el periodo de estudio por cada contaminante, por medio del método de regresión lineal múltiple, ya que permite construir una medida de distancia entre los datos faltantes, en comparación con los casos similares de cifras existentes, a través del mecanismo de valores perdidos completamente al azar. Además de obtener la media aritmética, la regresión lineal estima la covarianza y una matriz de correlaciones que permite establecer la relación lineal entre las concentraciones.

De acuerdo al análisis previamente realizado se estableció que para PM_{10} se analizaría desde el año 2005 y hasta el año 2012, debido a que se contaba con un 75% de datos válidos para cada una de las franjas horarias, mientras que para los demás contaminantes atmosféricos se estudiarían de forma anual, sin tener en cuenta las estaciones por la falta de información que se dio durante este día en el periodo comprendido entre 2002 a 2015.

- **Imputación de las bases de datos del PM_{10} por medio del software IBM Statistics SPSS**

Se realizó la imputación de los datos ausentes mediante un análisis de regresión lineal múltiple previamente nombrado, se eligió diez imputaciones que permitieran el ajuste adecuado de la media de los datos con aquellos que fueron completados después de la imputación, esta etapa se desarrolló solamente con el contaminante criterio de PM_{10} , ya que en el análisis y depuración de los datos se obtuvo un porcentaje de 75% de datos válidos para cada una de las estaciones.

- **Estimación de la concentración máxima y del promedio aritmético para cada uno de los contaminantes criterio**

Se estimó el promedio aritmético para cada una de las franjas horarias establecidas, las cuales fueron seleccionadas según las horas en donde se registró un mayor o menor flujo de movilidad en la ciudad de Bogotá, D.C., de acuerdo con los informes de la secretaria de movilidad y los horarios de pico y placa para los vehículos, así mismo se extrajo la concentración máxima de cada periodo, en la tabla 8 se presentan las franjas horarias y el intervalo de tiempo que corresponde a cada una.

Tabla 8. Franjas horarias

Franja	Hora
1	1:00 a.m. – 5:00 a.m.
2	6:00 a.m. – 8:00 a.m.
3	9:00 a.m. – 4:00 p.m.
4	5:00 p.m. – 7:00 p.m.
5	8:00 p.m. – 12:00 a.m.

Fuente. Autores

4.3. Etapa 3. Elaboración de los mapas temáticos de PM_{10}

- **Selección del método de interpolación**

Para la elaboración de los mapas del contaminante atmosférico PM_{10} en el Software ArcGis 10.2.2 se adjuntó un archivo de MSEXCEL® con datos de las estaciones de la RMCAB (altitud, longitud, altura y concentración promedio del contaminante), de donde se obtuvo un Shapefile con la información de la ubicación geográfica y las cifras de polución de cada una de las estaciones analizadas para los años 2005 a 2012 por franja horaria. Por otro lado para elaboración de los mapas temáticos se

eligió el método de interpolación IDW, debido a que los datos de las concentraciones del contaminante criterio presentaron las siguientes características: eran estacionarios, poseían un tipo de distribución aleatoria, además no poseían un mismo comportamiento permitiendo realizar una correlación espacial.

4.4. Etapa 4. Correlación entre los contaminantes criterio y las variables climatológicas

- **Análisis de las correlaciones realizadas entre las variables climatológicas y los contaminantes criterio**

Para esta etapa se realizaron gráficas de los contaminantes criterio en relación con los diferentes factores climatológicos como lo son la temperatura, humedad relativa y precipitación, de igual forma se calculó el coeficiente de Pearson de las variables analizadas, ya que proporciona información acerca del grado de relación lineal que tienen dos variables cuantitativas.

4.5. Etapa 5. Análisis de los contaminantes criterio frente a las GCA, resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 en el día sin carro

- **Establecer el comportamiento de los contaminantes criterio frente a las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017**

Con el propósito de identificar el comportamiento y el cumplimiento de las concentraciones de los contaminantes criterio analizados, se realizó una comparación frente a los niveles máximos permisibles determinados GCA de la OMS, resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017, de esta manera se analizó el PM_{10} a partir de la información obtenida de las estaciones de la RMCAB para cada una de las franjas horarias desde el año 2005 y hasta el año 2012, por otro lado para O_3 , SO_2 , NO_2 y CO el análisis se desarrolló con las concentraciones obtenidas para cada uno de los años del periodo comprendido entre 2002 hasta el 2015 de las cinco franjas horarias establecidas.

- **Identificar el comportamiento de los contaminantes criterio y su incidencia en la salud de la población**

La OMS establece unos objetivos intermedios que permiten realizar políticas públicas, determinando unos límites permisibles para la protección de la salud pública, con los cuales se elaboró una comparación con las concentraciones obtenidas de cada uno de los contaminantes criterio para el día sin carro permitiendo establecer la incidencia en la salud de la población de la ciudad de Bogotá, D.C.

4.6. Etapa 6. Análisis de los informes de la SDA y del parque automotor en el día sin carro

- **Comparación de los informes de la SDA frente a los contaminantes criterio**

Con base a los informes anuales generados por la SDA en el día sin carro, los cuales proporcionan un balance general de los resultados obtenidos durante la jornada, en términos de calidad del aire dentro de la ciudad, se desarrollaron gráficas con el promedio de los datos estimados en la investigación y las concentraciones de cada uno de los contaminantes analizados en los informes. Los valores reflejados en las gráficas representan una comparación que permitió identificar el aumento o la disminución del contaminante en el periodo comprendido entre 2002 y 2015.

- **Determinar las condiciones del parque automotor para la jornada del día sin carro**

Se realizaron gráficas y tablas donde se evidenció el número de flota vehicular inscrita en el Registro Distrital Automotor de la ciudad de Bogotá, D.C., para cada año desde el 2002 hasta el 2015, teniendo en cuenta el tipo de combustible utilizado para su funcionamiento segregando los vehículos de servicio especial, público y de carga, por otra parte, se tuvo en cuenta la clase de vehículo de transporte del parque automotor.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Estado de la flota vehicular en la ciudad de Bogotá, D.C.

- **Condiciones del combustible y tecnología del parque automotor**

En la tabla 9 se evidencia que el principal combustible utilizado por los vehículos de transporte público y de carga es el diésel generando altas concentraciones PM_{10} , SO_2 y NO_2 durante el proceso de la combustión [68]. De acuerdo al número de automotores inscritos en el Registro Distrital Automotor (RDA), se encontró que la mayoría de las fuentes móviles que necesitan este fósil para su movilización fueron los buses con un valor de 11.767 y dentro del tráfico pesado se destacaron las camionetas con 29.629 y los camiones con un total 2.866, esto para los modelos desde años anteriores al 2002 hasta posteriores al año 2014 [68].

El segundo combustible que es más implementado para el funcionamiento de los vehículos es la gasolina, la cual genera grandes cantidades de emisiones de CO por la combustión interna [68]. Según la información encontrada sobre la cantidad de vehículos registrados en el RDA, se identificó que las motos y las camionetas registraron las mayores cifras inscritas con valores de 449.099 y 223.718 respectivamente, donde se encontró que las motos son el medio de transporte con los valores más altos de unidades a comparación de la demás flota vehicular inscrita en la ciudad de Bogotá, D.C., ya que a lo largo de los años ha presentado un crecimiento paulatino al pasar de 23.029 vehículos en modelos anteriores al año 1992, los cuales utilizaban únicamente la gasolina como combustible, en contraste a los modelos siguientes al 2014 con una cifra de 103.702, donde empleaban otras fuentes para su movimiento como lo son el diésel y el gas natural vehicular [67].

Las autoridades ambientales establecieron normas más exigentes en las características de los combustibles fósiles usados en el parque automotor que circula por la ciudad, con el propósito de reducir las emisiones de contaminantes criterio, en Bogotá, D.C. Los vehículos registrados en el RDA que utilizan otro tipo de combustible han aumentado a través del tiempo de forma mínima. Sin embargo, este crecimiento no se ve reflejado en el número de unidades en los modelos posteriores al 2014 [67].

Tabla 9. Tipo de combustible por clase de vehículo inscrito en el RDA

Tipo de combustible por clase de vehículo		Modelo						TOTAL GENERAL
		1992 Y ANTERIORES	1993 A 1997	1998 A 2002	2003 A 2007	2008 A 2013	2014 Y POSTERIORES	
Pasajeros	Motocicleta							
	Diésel	0	0	0	0	1	4	5
	Eléctrico	0	0	0	3	95	77	175
	Gas-Gasolina	0	0	0	0	1	0	1
	Gas natural vehicular	0	0	0	0	0	3	3

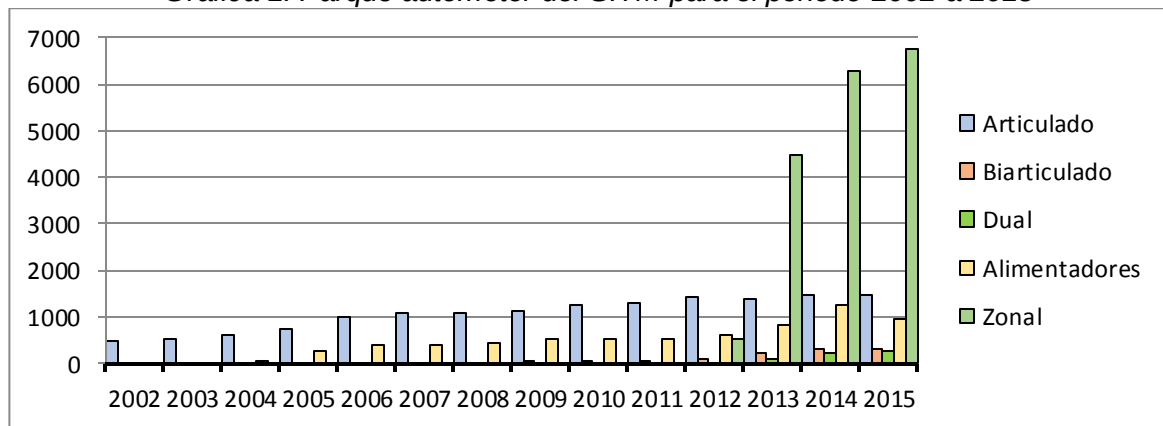
	Gasolina	23.029	3.836	2.623	67.551	248.442	103.618	449.099
	TOTAL	2.3029	3.836	2.623	67.554	248.539	103.702	449.283
	Bus							
	Diesel	498	272	1.210	3.459	2.408	3.920	11.767
	Diesel-Eléctrico	0	0	0	0	20	266	286
	Gas-Gasolina	3	0	0	0	0	0	3
	Gas natural vehicular	0	0	1	1	0	0	2
	Gasolina	1.048	27	1	1	5	5	1.087
	Eléctrico	0	0	0	0	0	1	1
	TOTAL	1.549	299	1.212	3.461	2.433	4.192	13.146
	Microbús							
	Diesel	41	473	1.059	1.829	1.196	115	4.713
	Gas-Gasolina	39	278	63	13	1	0	394
	Gas natural vehicular	2	9	0	1	0	0	12
	Gasolina	473	1662	290	41	43	61	2.570
	TOTAL	555	2.422	1.412	1.884	1.240	176	7.689
	Camión							
	Diesel	1.581	287	136	417	341	104	2.866
	Gas-Gasolina	191	19	0	2	0	0	212
	Gas natural vehicular	6	1	0	0	0	0	7
	Gasolina	5.908	345	89	271	156	34	6.803
	TOTAL	7.686	652	225	690	497	138	9.888
	Camioneta							
	Diesel	783	494	321	4.445	17.386	6.200	29.629
	Diesel-Eléctrico	0	0	0	0	0	1	1
	Eléctrico	0	0	0	0	0	2	2
	Gas-Gasolina	1.413	1.896	508	566	1.082	393	5.858
	Gas natural vehicular	19	23	2	10	13	6	73
	Gasolina	40.792	24.905	10.074	16.149	72.292	59.506	223.718
	TOTAL	43.007	27.318	10.905	21.170	90.773	66.108	259.281
Carga								

Fuente. [64]

Por otro lado, el parque automotor tipo taxi en Bogotá, D.C., ha presentado un incremento, pues pasó de 50.891 unidades en el año 2003 a 51.547 unidades en el año 2015. En el año 2010 con 51.798 unidades se alcanzó la cifra más alta para el período del estudio, y a partir de este año existió una disminución en las cifras de automotores inscritos en el RDA. Sin embargo, en este periodo de tiempo no existió un crecimiento representativo, debido al congelamiento de matrículas existentes a partir de la expedición del Decreto 613 de 1993, razón por la cual, la cantidad de estos vehículos no aumentaron. No obstante, las diferentes sentencias judiciales interpuestas por usuarios para matricular algunos taxis, generó un leve incremento [65].

Según la clasificación determinada por la legislación colombiana se encontró que la flota vehicular del Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM) ha presentado un incremento pues pasó de 477 vehículos en el año 2002 a 9.742 para el 2015. Como consecuencia de la eliminación de las rutas tradicionales y la incorporación del Sistema Integrado de Transporte Publico (SITP), en los tres últimos años del periodo de estudio se registró un aumento de automotores de tipo zonal alcanzando una cifra de 676.900 en el 2015. En el caso de los alimentadores, se pasó de 67 vehículos en el año 2004 a 946 para el 2015, debido a la alta demanda de usuarios que necesitaron trasladarse hacia y desde los portales a sus lugares de destino, como se evidencia en la gráfica 1 [66].

Gráfica 1. Parque automotor del SITM para el periodo 2002 a 2015



Fuente. [67]

Así mismo se observó un comportamiento constante en los vehículos de tipo articulados, biarticulados y duales, no obstante al terminar el periodo de estudio analizado se evidenció un incremento de los mismos, debido a la necesidad de la población para movilizarse. El sistema integrado de transporte masivo a partir del año 2002 utilizó para el funcionamiento de sus buses el combustible diésel en las tres fases de su operación hasta el 2014, en donde para renovar su parque automotor incorporó los vehículos híbridos, los cuales reducen el consumo de combustible en un 30%, disminuyendo de esta manera en un 40% las emisiones de contaminantes criterio. Por último, para el año 2015, y, con el propósito de modernizar la flota vehicular ingresaron nuevos automotores con un sistema eléctrico dando cumplimiento al plan de ascenso tecnológico del 2013 [69].

Como se muestra en la tabla 10, se presentó una evolución en la tecnología de los vehículos de carga desde el año 2002 con Euro II, para empezar un proceso de mejora a partir del 2012 implementando la tecnología Euro IV hasta el año 2015. Así mismo, la flota vehicular de transporte público convencional mostró un progreso similar al del parque automotor de carga. Sin embargo, el desarrollo de tecnología Euro IV inició para estos automotores en el año 2011, mientras que el proceso en el avance de la tecnología Euro para los vehículos que conforman el SITM fue un

poco más rápido, debido a que se buscó reemplazar los autobuses que funcionaron con tecnologías obsoletas, las cuales emitían altas concentraciones de contaminantes criterio en las fases I y II del sistema, por nuevos vehículos con motores que ingresaron con requisitos técnicos para la reducción de emisiones según lo estipulado en el decreto 477 del 21 de octubre de 2013.

Además, los automotores entrantes adoptaron los estándares de la tecnología Euro IV en un periodo transitorio para el sector automotriz, de acuerdo con lo establecido en la resolución 1111 de 2013 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). El proceso de renovación del parque automotor del SITM inició desde el 2009 con Euro IV hasta el 2012, año en el cual, se instauró la tecnología Euro V que presentó un filtro el cual disminuyó en un 25% las emisiones de NOX [70,71, 72, 73,74].

Tabla 10. Evolución de la tecnología Euro en los vehículos desde el año 2002 a 2015

TIPO DE TRANSPORTE	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Vehículos de transporte público convencional	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro IV	Euro IV	Euro IV	Euro IV	Euro IV
Vehículos de SITM	Euro II	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro III	Euro IV	Euro IV	Euro IV	Euro IV	Euro V	Euro V	Euro V
Vehículos de carga	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro II	Euro IV	Euro IV	Euro IV	Euro IV

Fuente. [70]

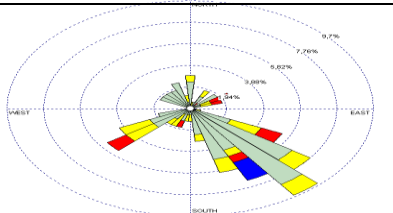
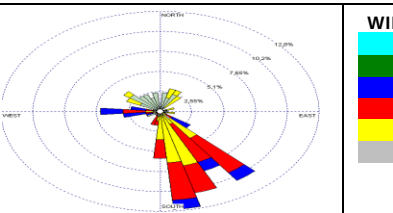
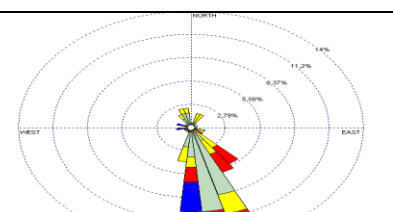
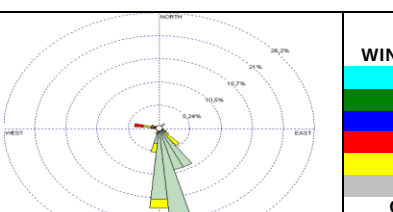
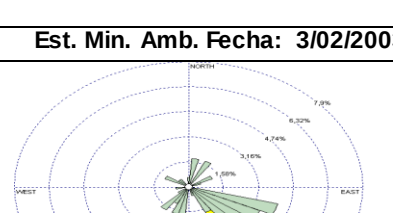
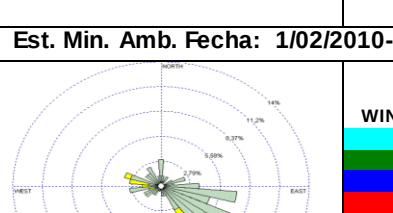
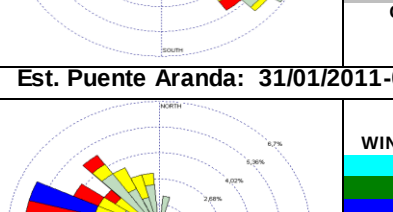
Finalmente dentro del periodo del estudio, se encontró que la población de Bogotá, D.C., presentó un crecimiento del 1,18% desde el año 2005 y hasta el año 2010, provocando un aumento del 10,8% [65,75], en el número de la flota vehicular de servicio público, privado y de carga, generando en la movilidad de la ciudad aspectos negativos, tales como el incremento en la congestión vial y el tiempo de desplazamiento de los vehículos, aportando valores altos en las concentraciones de contaminantes criterio, los cuales afectan directamente a largo o corto plazo la salud de la población; por este motivo es importante la implementación de medidas de restricción vehicular como lo es el día sin carro.

Para esta jornada, en el año 2015, según la Secretaria de Movilidad se estimó que dejaron de circular aproximadamente 1'500.000 vehículos particulares y 400.000 motocicletas. Y, con el propósito de suplir la demanda del número de pasajeros el SITP atendió el 32% de usuarios que antes eran atendidos por el transporte público colectivo con una edad promedio de entre 10 y 15 años. Otro tipo de flota vehicular que puede transitar durante el día sin carro en Bogotá, D.C., es el de transporte de carga, para el año 2017 se contaba con 414.816 unidades a nivel nacional, en donde el 72% correspondía a camiones con edades menores a los 5 años en comparación a los tractocamiones que poseía un 16,63% con una edad mayor a los 20 años [66].

5.2. Análisis de las rosas de los vientos

Las rosas de vientos se elaboraron mediante el software WRPLOT, que permite observar de manera gráfica si existen ciertas velocidades predominantes y cuáles son sus direcciones, existiendo una gran probabilidad de que altas concentraciones de los contaminantes criterio se presenten y se movilen hacia algunos lugares definidos de la ciudad de Bogotá, D.C. A continuación se presentan las rosas de los vientos más representativas generadas año a año para la semana donde se llevó acabo el día sin carro para cada una de las estaciones de la RMCAB en el periodo de estudio comprendido entre 2002 a 2015(Tabla 11):

Tabla 11. Rosas de vientos obtenidos para el periodo analizado

Est. Kennedy Fecha: 29/01/2007-04/02/2007 	Est. Kennedy Fecha: 1/02/2010-07/02/2010 
Est. Tunal Fecha: 29/01/2007-04/02/2007 	Est. Tunal Fecha: 1/02/2010-07/02/2010 
Est. Min. Amb. Fecha: 3/02/2003-09/02/2003 	Est. Min. Amb. Fecha: 1/02/2010-07/02/2010 
Est. Puente Aranda: 29/01/2007-04/02/2007 	Est. Puente Aranda: 31/01/2011-06/02/2011 

Fuente. Autores

Durante el periodo de estudio se observó un comportamiento similar en el viento, caracterizado por presentar una dirección hacia el sur, suroriente y suroccidente en la semana en que se llevó a cabo la jornada del día sin carro en Bogotá, D.C. En el periodo de estudio, que va del año 2002 al año 2015, se evidenciaron masas de aire las cuales se trasladaron al oriente de la ciudad. Sin embargo, son leves, persistentes y de menores velocidades a comparación de los vientos existentes en la zona suroccidental de la capital. Además, en el norte de Bogotá, D.C., se evidenciaron vientos con bajas velocidades en el tiempo investigado.

La estación de Kennedy se destacó por registrar las velocidades más altas en los años analizados, mostrando valores entre los 3.6 m/s y los 8.8 m/s en dirección al suroccidente, donde sobresalen los años 2007 y 2010. En contraste a la estación de Tunal, la cual mostró velocidades menores a 2.1 m/s en dirección al suroriente en los años 2008 y 2010. Estas mismas características se presentaron en la estación de Min. Ambiente en 2003 y 2010. Finalmente a lo largo de los años la única estación que presentó un comportamiento distinto a las demás fue Puente Aranda, debido a que en la mayoría de los años los vientos se dirigieron al occidente, posiblemente porque se vio afectada al encontrarse en una zona comercial, industrial e institucional y con un alto flujo vehicular en el centro de la ciudad. En relación con lo antes expuesto es probable que las mayores concentraciones atmosféricas se localizaran en el suroccidente, suroriente y sur de la ciudad, ya que los vientos presentes en estas zonas de la ciudad contribuyen a la recirculación de los contaminantes criterio.

5.3. Correlación entre los contaminantes criterio y variables climatológicas

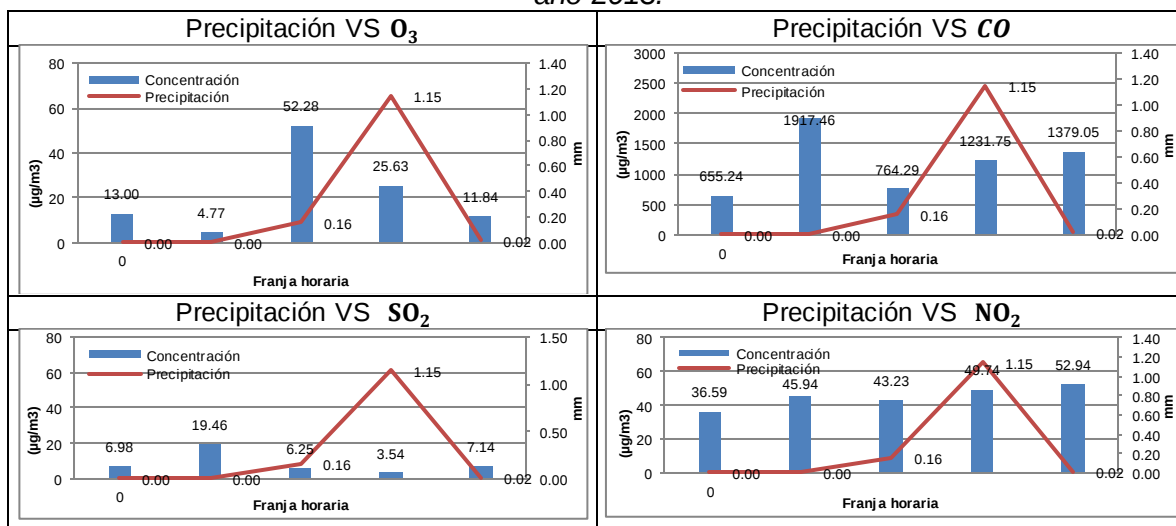
- **Precipitación**

Los años en los cuales se presentó una ausencia total de datos de precipitación fueron 2004, 2009, 2010, 2012 y 2015. Para los demás años de estudio en la jornada del día sin carro se observaron dos comportamientos. En el primero, se presentaron picos de lluvia en las franjas 2, 3 y 4 donde en el año 2013 se registró el valor más alto con 1,15 mm, mientras que en las franjas 1 y 5 no se evidenció presencia de la misma. Otro comportamiento que se identificó fue el aumento de la precipitación desde la franja 1 hasta la franja 3 para así disminuirse paulatinamente hasta la franja 5.

Se encontró una correlación positiva en la franja 2 para el CO , SO_2 , NO_2 y PM_{10} , ya que sus concentraciones aumentaron asociado posiblemente por un incremento en la circulación de la flota vehicular que no tenía una restricción durante el día sin carro, además de la presencia de lloviznas de baja intensidad las cuales no realizaron un proceso total de lavado de las partículas. No obstante, se observó un patrón diferente en el O_3 en los años del periodo de estudio, debido a que en la franja 2 aumentaron las concentraciones de este gas atmosférico frente a valores

mínimos de la variable meteorológica analizada como se evidenció en el año 2013. Para finalizar todos los contaminantes criterio analizados en las franjas 3 y 4 presentaron una correlación negativa, en donde al aumentar la precipitación se observó una reducción en los valores de los contaminantes para la mayoría de los años del periodo de estudio (tabla 12).

Tabla 12. Correlación Precipitación frente a la concentración de contaminantes criterio, año 2013.



Fuente. Autores

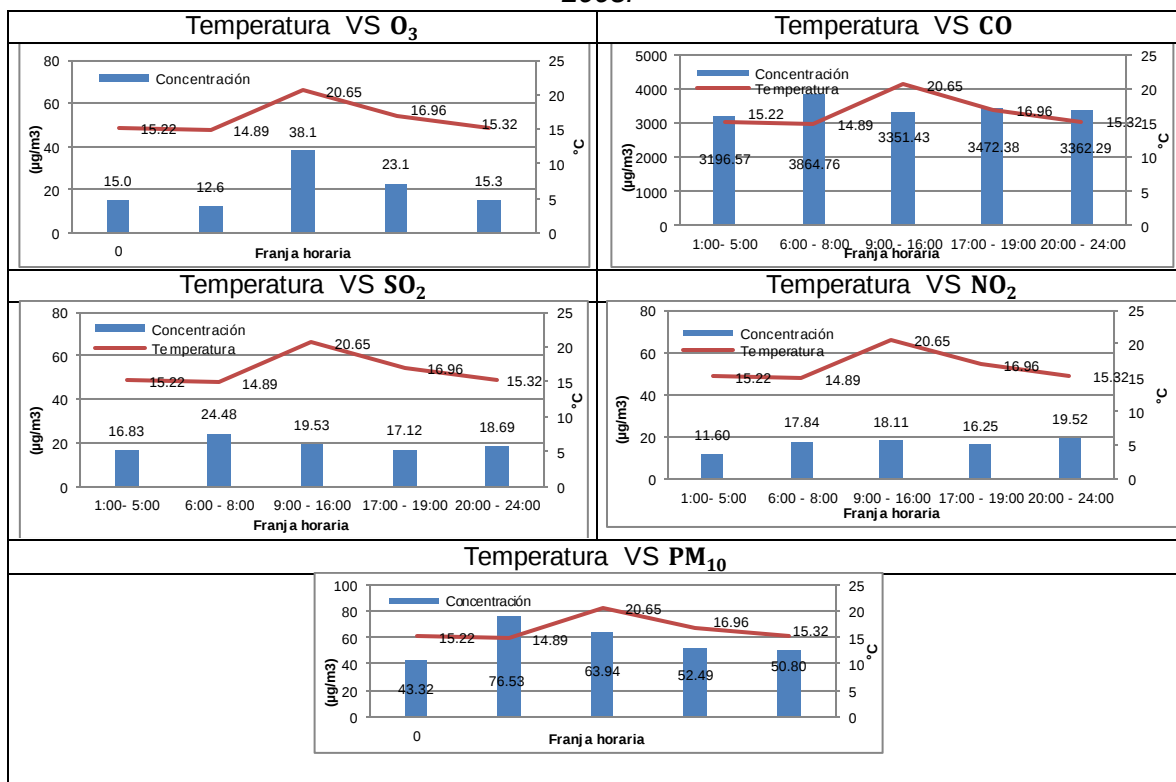
- **Temperatura**

Para esta variable climatológica se observaron dos escenarios. En el primero, se encontró un aumento de la temperatura desde la franja 1 hasta la 3, para posteriormente disminuir en las 2 franjas siguientes a esta. En el segundo escenario, se evidenció en la franja 1 una disminución de la temperatura hasta la franja 2 y se incrementó en la franja 3, a partir de esta se redujo la variable climatológica en las franjas 4 y 5, así mismo la temperatura más alta que se registró fue de **20,65°C** en el año 2005 para la franja 3, por el contrario en el año 2007 se presentó la temperatura más baja con un valor de **6,38°C** correspondiente a la franja 2 (tabla 13).

Las franjas 2 y 3 no registraron una correlación positiva entre la temperatura y la concentración de **CO**, **NO₂** y **PM₁₀**, debido a que en la mayoría de los años para la franja 2 los valores de los contaminantes criterio aumentaron mientras que la temperatura fue menor, a comparación de la franja 3 en donde ocurrió lo opuesto, es decir si aumentaba la temperatura disminuía la concentración de los contaminantes analizados. Por otro lado, para todos los años de la investigación, la variable meteorológica presentó una correlación positiva con el **O₃**, ya que al incrementar el valor de la temperatura pudo provocar un aumento de este

contaminante en la franja 3, asociado a la radiación solar. Finalmente, en ningún de los años analizados se encontró una correlación positiva entre el contaminante SO_2 y la variable climatológica en las franjas 2 y 3.

Tabla 13. Correlación temperatura frente a la concentración de contaminantes criterio, año 2005.



Fuente. Autores

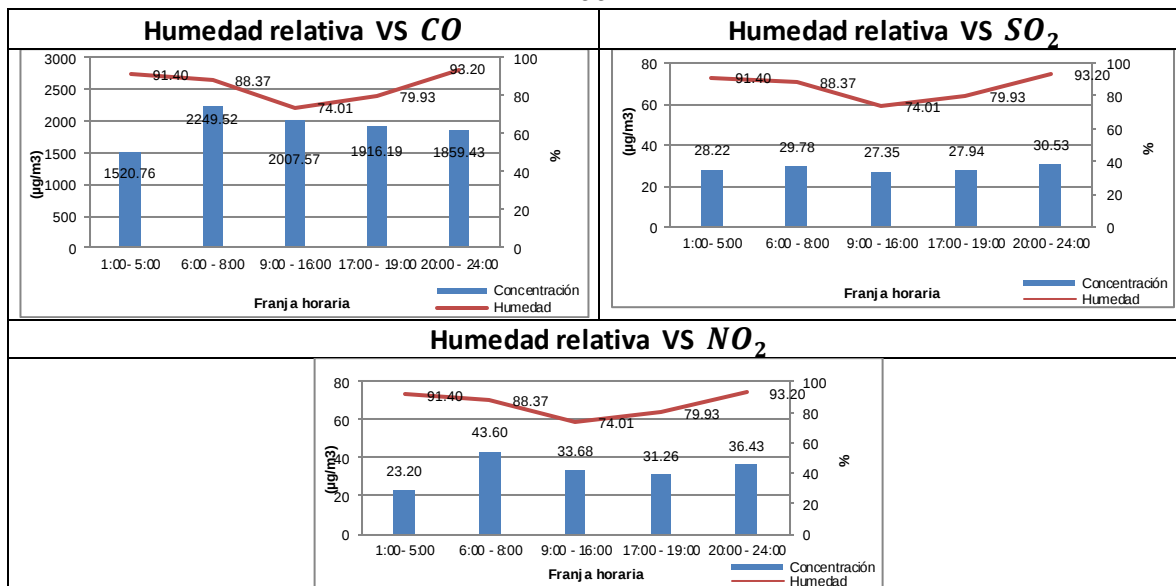
- **Humedad relativa**

En el periodo de estudio la variable meteorológica registró dos comportamientos. En el primero, el valor de humedad relativa en la franja 1 y 2 aumentó; en la siguiente franja disminuyó y posteriormente en las franjas 4 y 5 se incrementó el porcentaje de humedad. Por otra parte, en el segundo comportamiento, a partir de la franja 1 hasta la 3 se redujo, luego en la franja 4 este porcentaje se incrementó, para finalizar la jornada del día sin carro con una reducción de esta variable climatológica. El porcentaje más bajo de humedad relativa que se obtuvo para el estudio fue de 43,38 % el año 2011 para la franja 3, en cambio en la franja 5 se evidenció el valor más alto con un valor de 93,20% en el año 2002 (tabla 14).

En los años analizados en la franja 3 las concentraciones de O_3 fueron elevadas con un porcentaje bajo de humedad relativa para el día sin carro, esta misma relación se observó para los contaminantes PM_{10} , NO_2 y CO en los años 2002, 2008, 2010, 2011, 2012 y 2014, finalmente el SO_2 presentó una correlación lineal

positiva en la franja 3, ya que se registró un porcentaje bajo de humedad relativa junto a una reducción de los valores del contaminante criterio asociado posiblemente a la circulación del parque automotor de transporte público, especial y de carga durante la jornada de restricción vehicular.

Tabla 14. Correlación humedad frente a la concentración de contaminantes criterio, año 2002.



Fuente. Autores

5.4. Análisis del contaminante criterio PM_{10}

De las bases de datos de la RMCAB, se analizó el PM_{10} para el día sin carro en el periodo comprendido de 2005 hasta el año 2012, debido a que fue el único contaminante que cumplió con el criterio de selección, el cual, consiste, en la validación del intervalo de confianza en el cuartil tres (Q3), en donde se establece que se debe contar con la existencia del 75% de datos validos en una muestra. Las estaciones de San Cristóbal, Sagrado Corazón de Jesús y CADE energía se eliminaron por la ausencia total de datos. Los demás contaminantes criterio fueron analizados desde el año 2002 al 2015 para cumplir con el objetivo de la investigación [76].

El número de imputación de datos seleccionado para el PM_{10} fue de 10, ya que permitía realizar la observación de los datos semejantes por medio de la media aritmética de los valores ausentes frente a aquellos que fueron imputados; con cifras superiores a 10 imputaciones, las concentraciones del contaminante criterio aumentaban de manera errónea, debido a que no se ajustaban a la media sin imputar. En la tabla 15 se muestra la selección de los años cuyas estaciones presentan un 75% de datos válidos para PM_{10} , en donde el 100% indica la presencia total de los mismos y el 0% representa la ausencia total de la información.

Tabla 15. Datos validos por estación y por año para PM_{10}

Estación / Año	2002 (%)	2003 (%)	2004 (%)	2005 (%)	2006 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2009 (%)	2010 (%)	2011 (%)	2012 (%)	2013 (%)	2014 (%)	2015 (%)
Alto Rendimiento	0	0	0	95,8	100	100	58,3	100	100	100	87,5	100	100	100
Guaymaral	100	100	100	100	100	87,5	100	100	100	100	100	0	0	100
Kennedy	0	0	0	0	100	100	75	100	100	70.8	100	100	100	100
Las Ferias	95,8	0	0	95,8	100	95,8	100	100	100	100	100	83,3	100	100
Puente Aranda	100	100	87,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Suba	100	100	100	100	87,5	87,5	100	100	100	100	100	0	0	0
Tunal	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	100	83,3	100	100
Usaquén	100	0	83.3	12.5	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100
Cazucá	100	50	100	100	100	100	100	95.8	0	0	0	0	0	0
Chico Lago	100	100	100	95.8	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0
Fontibón	100	100	83.3	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0
Carvajal	100	100	100	100	95.8	100	100	100	100	95.8	100	100	100	100
San Cristóbal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	91,7	100	9,17
Cade Energía	100	100	70.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sagrado Corazón	100	100	0	0	0	0	0	58.3	100	0	62.5	0	0	0

Fuente. Autores

En el trabajo de investigación se encontraron las siguientes observaciones para el contaminante criterio PM_{10} :

- Las estaciones de Puente Aranda y Fontibón presentaron el 100% de los datos del contaminante para la fase seleccionada de la investigación.
- El menor número de datos se encuentran en las estaciones de Cazucá y Chico Lago con un porcentaje de 38% y 26% respectivamente.
- Para el PM_{10} los años que poseen mayor información son 2009 con un 85,42% y el 2010 con un 80,00%

- **Análisis de los mapas temáticos para PM_{10}**

Los mapas se realizaron para los años 2005 al 2012, solamente con el contaminante PM_{10} , mientras que para O_3 , NO_2 , SO_2 y CO se elaboraron gráficas comparativas. En la tabla 16 se enumeran las localidades que sirvieron como insumo para la elaboración de los mapas. Cabe destacar, que en la localidad de Sumapaz no se tuvo en cuenta en el análisis, ya que se considera una zona rural en la ciudad de Bogotá, D.C., además de no disponer de una estación de la RMCAB.

Tabla 16. Enumeración de las localidades de Bogotá, D.C., en los mapas temáticos

Número en el mapa	Localidad	Número en el mapa	Localidad
1	Santa Fe	11	Teusaquillo
2	Puente Aranda	12	Usaquén
3	Ciudad Bolívar	13	Chapinero
4	Barrios Unidos	14	Usme
5	Suba	15	Rafael Uribe Uribe
6	Antonio Nariño	16	Tunjuelito
7	Candelaria	17	Los Mártires
8	Engativá	18	Kennedy
9	Fontibón	19	Bosa
10	San Cristóbal		

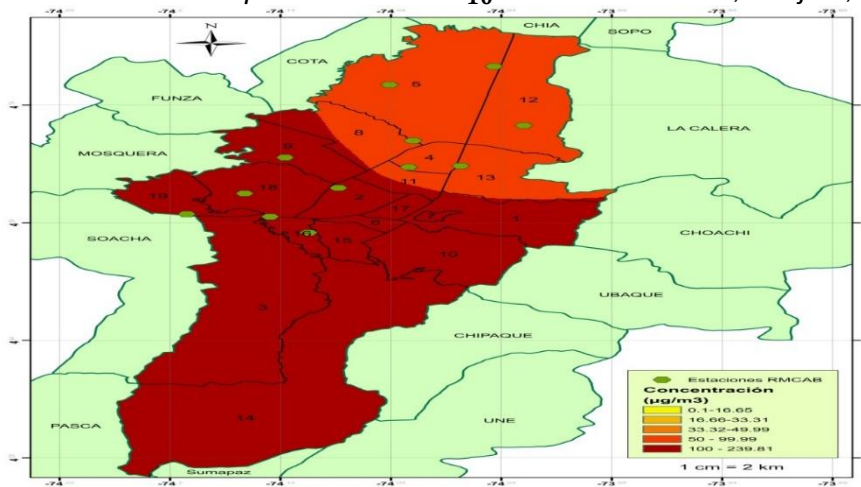
Fuente. Autores

- **Franja 1 (1:00 a.m. a 5:00 a.m.)**

En esta primera franja horaria se registraron las menores concentraciones de este contaminante, debido a que en las primeras horas de la mañana es baja la circulación de vehículos por las principales vías de la ciudad. Se destacó el año 2007 por presentar concentraciones entre $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $99,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el año 2012 (ilustración 2) con concentraciones a lo largo de la ciudad entre $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $49,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos resultados se dieron posiblemente, por la existencia de periodos cortos de lluvia, los cuales contribuyeron a la sedimentación del PM_{10} . En el periodo de investigación existió una disminución paulatina del contaminante criterio en las localidades de la ciudad, asociado a la mejora en las características del combustible y la tecnología empleados por los vehículos de transporte público, de carga y especial.

- **Franja 2 (6:00 a.m. a 8:00 a.m.)**

Ilustración 3. Concentración promedio de PM_{10} en el día sin carro, franja 2, año 2007



31

El aumento en las concentraciones de **PM_{10}** probablemente corresponden a un aumento en el número de vehículos de la flota vehicular de carga, especial y de transporte público que circula por las principales vías de la ciudad. Este último se utilizó para suplir la demanda de pasajeros en la hora pico entre las 6:00 a.m. a 8:00 a.m., al movilizar a la población a sus lugares de destino que no usaron su vehículo particular. Según estudios epidemiológicos realizados, la exposición a altas concentraciones de material particulado incrementa la probabilidad de efectos a corto y a largo plazo de enfermedades respiratorias en la salud de las personas que usan medios de transporte alternativo, como el uso de bicicleta, además de aquellas que se encuentran en el interior de los vehículos y a las personas que son vulnerables [77].

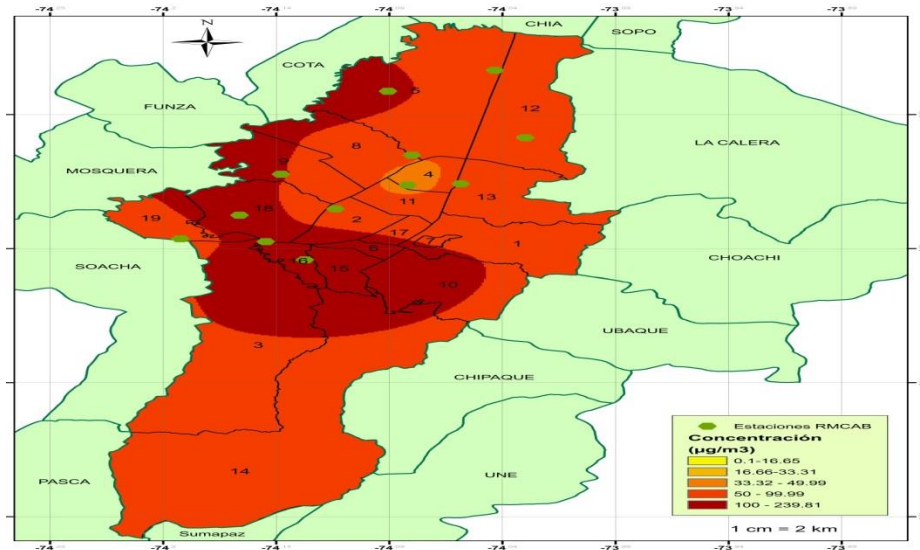
- **Franja 3 (9:00 a.m. a 4:00 p.m.)**

En el horario de 9:00 a.m. a 4:00 p.m., se produjo una reducción de las concentraciones de material particulado a lo largo de la ciudad en comparación a la franja anterior. Los valores del contaminante atmosférico no presentaron una tendencia para el periodo de estudio analizado. No obstante, en esta franja horaria en la mayoría de las localidades, las concentraciones fluctuaron entre los **$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$** y los **$100 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Por otro lado, en el año 2008 se presentó un foco de contaminación atmosférica en los cerros orientales asociado al incendio forestal que se registró durante la semana donde se llevó a cabo el día sin carro.

- **Franja 4 (5:00 p.m. a 7:00 p.m.)**

En la franja 4 nuevamente aumentaron las concentraciones para el día sin carro. Los años 2009 y 2010, se destacaron por presentar valores entre **$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$** a **$99,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$** para la mayoría de las localidades. Se encontró que desde el año 2005 y hasta el año 2008, las concentraciones aumentaron en algunas estaciones. A partir del año 2009 y hasta el año 2015, los valores de material particulado disminuyeron, destacándose en el periodo de investigación el 2008 (ilustración 4) en donde se registró un incendio, evento por el cual las emisiones registradas en esta franja aumentaron en las localidades de Rafael Uribe Uribe, Suba, Tunjuelito, Antonio Nariño, San Cristóbal y Kennedy con una concentración máxima que sobrepasó los **$100 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Además, este evento, se relacionó, con el transporte de los habitantes que se movilizaron para regresar nuevamente a sus hogares.

Ilustración 4. Concentración promedio de PM_{10} en el día sin carro, franja 4, año 2008

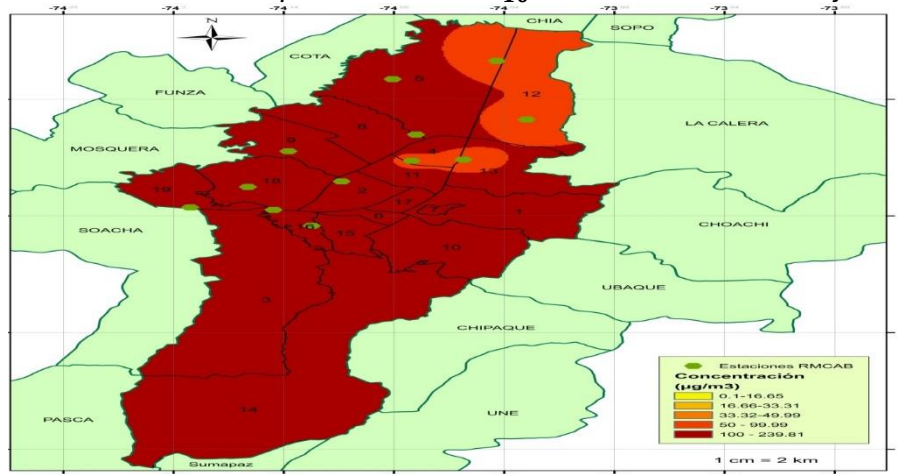


Fuente. Autores

- **Franja 5 (9:00 p.m. a 12:00 a.m.)**

Finalmente, en la franja 5 la restricción de la medida del día sin carro finaliza e inicia nuevamente la circulación de vehículos de forma normal. En los años anteriores al 2008 se registraron las mayores concentraciones. Se resaltó el año 2007 (ilustración 5), en donde la mayoría de las localidades registraron las máximas concentraciones del periodo de estudio, las cuales fueron superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por la baja circulación de las masas de aire en la ciudad el contaminante se concentró en diferentes sectores de Bogotá, D.C. A partir del año 2009, los valores de PM_{10} disminuyeron, mostrando una tendencia estable a lo largo de los años en algunas localidades en donde se encuentran los principales corredores viales.

Ilustración 5. Concentración promedio de PM_{10} en el día sin carro, franja 5, año 2007



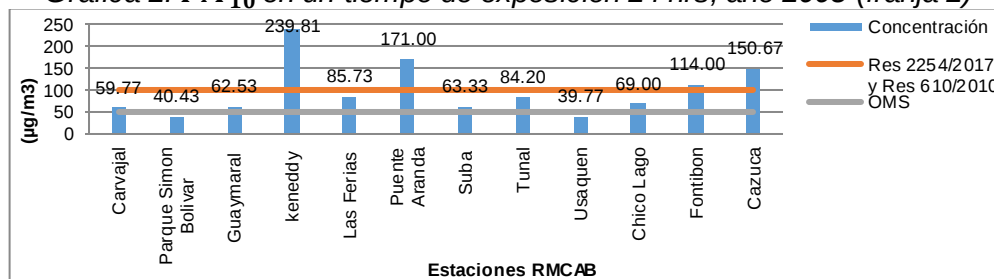
Fuente. Autores

- **Análisis de las gráficas comparativas para PM_{10} frente a las GCA de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 desde el año 2005 hasta el 2012**

Las mayores concentraciones para en un tiempo de exposición de 24 horas en el periodo de estudio se encontraron en la franja 2 y 4, posiblemente por el aumento de la circulación de la flota vehicular de transporte publico y de carga pesada por las vias de la ciudad en esas horas de la jornada del día sin carro. El año 2008 fue el año en común para las dos franjas horarias, presentando los valores mas altos de PM_{10} , en la estación de Kennedy en la franja 2, con una concentración de **239,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** (gráfica 2) y en la estación Tunal en la franja 4, con un valor de **193,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** sobrepasando así, los límites máximos permisibles establecidos en las GCA de acuerdo con las resoluciones 610 del 2010 y 2254 de 2017.

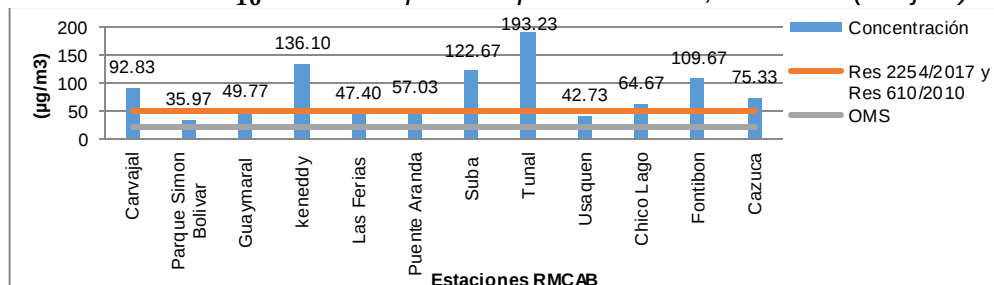
En las dos franjas las estaciones de la RMCAB que no superaron los niveles determinados en la legislación, fueron Parque Simón Bolívar y Usaquén. Por otro lado para un tiempo de exposición anual las únicas estaciones que no sobrepasaron el nivel de **50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** fueron Parque Simón Bolívar y Usaquén en las franjas 2 y 4, además de Guaymaral y Las Ferias para la cuarta franja. Las demás estaciones analizadas superaron los valores estipulados por los tres documentos siendo de **20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** y **50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** (ver gráfica 3).

Gráfica 2. PM_{10} en un tiempo de exposición 24 hrs, año 2008 (franja 2)



Fuente. Autores

Gráfica 3. PM_{10} en un tiempo de exposición anual, año 2008 (franja 4)

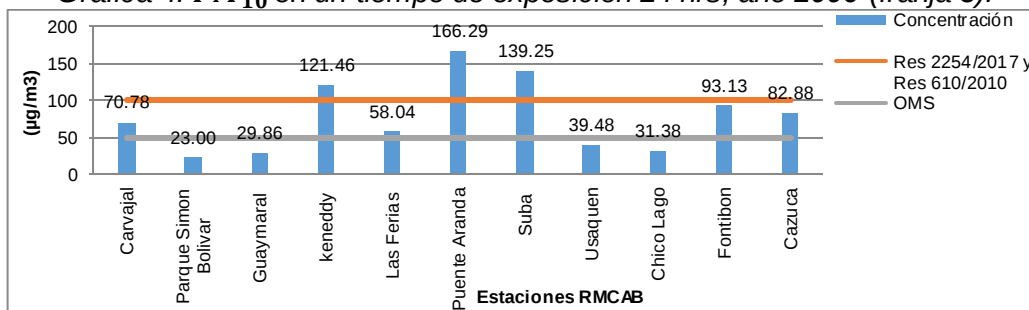


Fuente. Autores

En las franjas horarias 1,3 y 5 se presentaron las menores concentraciones de PM_{10} en los años 2007, 2006 y 2008 respectivamente, debido probablemente a la disminución en la demanda del parque automotor de servicio público por parte de los ciudadanos en el día sin carro, por medio de las gráficas realizadas se encontró que para un tiempo de exposición de 24 horas en la franja 1, la estación de Usaquén registró la menor concentración con un valor de **42,16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . Por el contrario, en la franja 3 el valor más bajo del contaminante criterio fue de **23,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en la estación de Parque Simón Bolívar, sin sobrepasar los valores estipulados en las GCA de acuerdo con las resoluciones 610 del 2010 y 2554 del 2017, tal como se presenta en la gráfica 4. En la ultima franja para el día sin carro, solamente la estación de Suba excedió los niveles establecidos en dichas resoluciones, con una concentración de **141,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** para el año 2008.

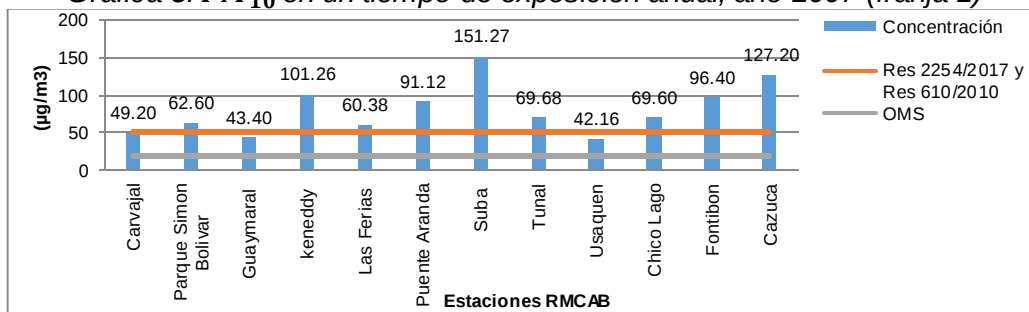
Finalmente, para un tiempo de exposición anual la estación de Suba superó el valor de **20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** y **50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** establecidos para las tres franjas horarias anteriormente mencionadas. Se destacaron las estaciones de Kennedy, Puente Aranda, Fontibon y Cazuca por sobrepasar los niveles de las GCA establecidos en las resoluciones 610 del 2010 y 2554 del 2017, en las franjas 1 (gráfica 5) y 3 de la jornada del día sin carro.

Gráfica 4. PM_{10} en un tiempo de exposición 24 hrs, año 2006 (franja 3).



Fuente. Autores

Gráfica 5. PM_{10} en un tiempo de exposición anual, año 2007 (franja 1)



Fuente. Autores

- **Incidencia en la salud por PM_{10}**

A continuación, se muestran los efectos asociados a las concentraciones del contaminante PM_{10} en el día sin carro para la ciudad de Bogotá, D.C., en el periodo de estudio que va desde el año 2005 al año 2012 tabla 17.

Tabla 17. Efectos en la salud por exposición a PM_{10}

Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Efectos a la salud por PM_{10}
>150	• La población expuesta a niveles elevados de PM_{10} posiblemente sufrieron una disminución entre 3 a 6% en la función pulmonar medido por un medidor de flujo espiratorio. • Para un tiempo de exposición anual se encontró que la franja 2 de acuerdo a las GCA de la OMS, fue la única que registró concentraciones mayores a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indicando un posible aumento en el riesgo de mortalidad a largo plazo en un 15%.
>100	• Se incrementa en un 16% el riesgo relativo de mortalidad y de igual manera un 12% el número de hospitalizaciones por enfermedades respiratorias. • En un tiempo de exposición de 24 horas para el objetivo intermedio 1 las concentraciones de todos los años para cada una de las franjas analizadas, se encontraron por debajo de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donde posiblemente se disminuyó el riesgo alrededor del 5% de la mortalidad a corto plazo. • Los valores en la franja 2 para la mayoría de los años se presentaron por encima de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del objetivo intermedio 2, aumentando de esta manera la probabilidad de muerte en un 2.5%, en un tiempo de exposición de 24 horas.
>50	• Se atribuye un aumento de 2.17 % en las consultas por causas en crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas (ERA). • Para el objetivo intermedio 2 la franja 1 fue la única que presentó valores por debajo a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en los años 2005, 2010 y 2012 en los cuales se pudo producir beneficios en la salud, además de reducir la mortalidad prematura en un 6%, en un tiempo de exposición anual.
>30	• Puede producir aumento 2.5% de las ERA • Las concentraciones del periodo entre los años 2005 al año 2012 en cada una de las franjas horarias superaron el valor de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ propuesto en el objetivo intermedio 3 en un tiempo de exposición anual, probablemente se incrementó el riesgo de muerte en un 6% produciendo daños en la salud de la población de la ciudad de Bogotá, D.C.

Fuente. [78, 79, 80, 81]

De acuerdo con un informe realizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en Colombia en el año 2012 murieron alrededor de 5.000 personas al año dentro de una población de 45.6 millones de habitantes, a causa de enfermedades del sistema respiratorio y accidentes cardiovasculares, debido a la exposición a este contaminante criterio. En comparación con otros países de América Latina como Argentina, se atribuyeron 13.100 muertes por la exposición a material particulado cuya población era de 38.7 millones personas. Estudios demostraron que, en el día sin carro, es baja la exposición de las personas que seleccionaron la bicicleta como medio de movilización en comparación con las personas que viajaron dentro de automóviles y autobuses. Sin embargo, la dosis de aire inhalado por los ciclistas es alta [82].

5.5. Análisis del contaminante criterio O_3

Para el contaminante criterio ozono troposférico se elaboró un análisis entre los años 2002 a 2015 para cada una de las franjas horarias, en donde se realizó una comparación con los valores máximos de cada una de estas, con respecto al límite máximo establecido por las GCA de la OMS, con base en las resoluciones 610 de 2010 y 2254 del 2017 para un tiempo de exposición de 8 horas a partir de gráficas, por otra parte no se generaron mapas temáticos, ya que las bases de datos no poseían el 75% de datos válidos. A continuación, se presentan los aspectos de mayor relevancia encontrados de O_3 en la investigación luego de depurar la información obtenida de la RMCAB:

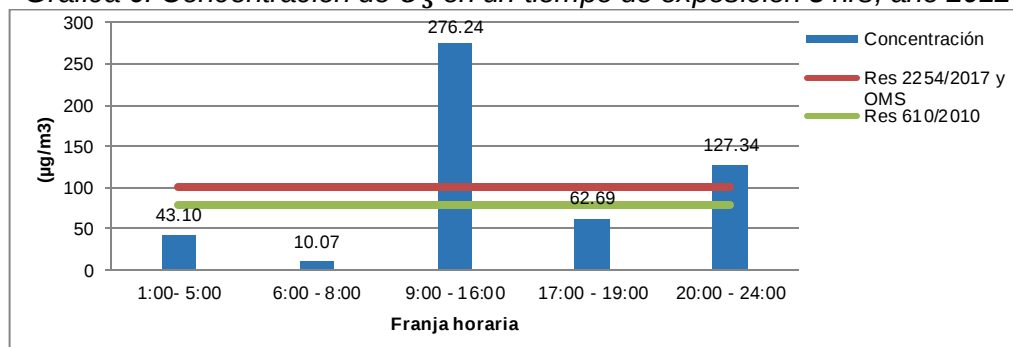
- El O_3 fue el contaminante criterio con la mayor ausencia de datos, correspondiente al 60,83% de información faltante.
- La estación con mayor información completa de O_3 fue Carvajal con el 86.30%.
- El año con el número más alto de datos para O_3 fue 2009 con un 79,44% mientras que para el año 2003 no se obtuvieron registros para ninguna de las franjas horarias de la investigación, probablemente por problemas en el funcionamiento de la estaciones de monitoreo de la RMCAB.
- Las estaciones con menor cantidad de datos fueron Kennedy, Cazucá y Chico Lago con 14.28%, 10.41% y 13.69% respectivamente, posiblemente asociado a fallas en la recolección de datos en las estaciones de monitoreo en el día sin carro.

- **Análisis de las gráficas comparativas para O_3 frente a las GCA de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 desde el año 2002 hasta el 2015**

Para la franja 1 la concentración más alta se presentó en el año 2015 con **46,43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , en la franja 2 fue de **35,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** para el 2007; por otra parte en la franja 3 se presentaron las mayores concentraciones del periodo de estudio a excepción de los años 2004, 2007, 2009 y 2015; se destacó el año 2012 por tener las mayores concentraciones de O_3 en el intervalo de la investigación con **276,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** y junto a la franja 5 con **127,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , se destacó como el único año en el cual 2 franjas horarias en el día sin carro sobrepasaron los valores estipulados por las GCA de la OMS, las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 (gráfica 6). Por último en la franja 4 el valor más alto fue de **72,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en el 2014. De acuerdo con las GCA de la OMS las concentraciones mayores a **240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** aumentan la posibilidad de efectos negativos en la salud de los peatones y ciclistas que transitan en el día sin carro en la ciudad de Bogotá, D.C. Sin embargo, las concentraciones del O_3 no disminuyeron a través de los años.

Se evidenció un comportamiento similar para todos los años de estudio en donde se presentaron las concentraciones más bajas de O_3 en la franja 1. Sin embargo, en la siguiente franja dichos valores presentaron una reducción, en la franja 3 aumentaron las concentraciones, posiblemente se asocia a un incremento de la temperatura lo cual contribuye a la formación de ozono troposférico, generándose por la reacción fotosintética compleja entre altos niveles de los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y radiación solar en la troposfera, asimismo los rayos solares permiten la ruptura de la capa de estabilidad térmica que origina la dispersión del contaminante criterio [83], además de una ausencia total o parcial de la precipitación, finalmente en las franjas 4 y 5 se redujeron las concentraciones del O_3 por las bajas temperaturas al finalizar el día sin carro.

Gráfica 6. Concentración de O_3 en un tiempo de exposición 8 hrs, año 2012



Fuente. Autores

- **Incidencia en la salud por O_3**

En la tabla 18 se identifican los efectos asociados a las concentraciones del contaminante O_3 en el día de la implementación de la medida en la ciudad de Bogotá, D.C., en el periodo de estudio de 2002 a 2015.

Tabla 18. *Efectos en la salud por exposición a O_3*

Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Años	Efectos a la salud por O_3
>240	2002 y 2012	• Se puede alcanzar disfunciones pulmonares en un 20% en individuos jóvenes sanos. • A concentraciones mayores a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se incrementa en un 100% los síntomas en personas asmáticas. • Irritación en las vías respiratorias generando tos, dolor de cabeza, dificultad al respirar, sensación incómoda en la garganta y/o en el pecho. • Se incrementa la fatiga desde 240 a 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cuando se realiza actividades al aire libre. • Los niveles altos de O_3 aumenta el número de personas con asma que sufren ataques por la irritación en el sistema respiratorio.
>160	2002 y 2012	• Irritación en el tejido pulmonar después de 6 horas de exposición, conllevando al daño y la inflamación de las células que conforman la capa interna de los pulmones. • Cambio transitorio en la función pulmonar en concentraciones entre 160 a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (la respiración se empieza a sentirse incómoda). • Los efectos en un tiempo de exposición de 6.6 horas, están asociadas a los cambios en la función pulmonar, aumento en la sensibilidad y la inflamación de las vías respiratorias en adultos que realicen actividades físicas al aire libre. • Para un tiempo de exposición de 8 horas los únicos años que sobrepasaron el límite establecido por el objetivo intermedio 1 con una concentración correspondiente de 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fueron 2002 y 2012, provocando efectos del tipo fisiológico e inflamatorio en los pulmones de adultos jóvenes sanos, quienes realizaron ejercicio durante periodos iguales o superiores a 6.6 horas, aumentando la probabilidad de las muertes diarias entre un 3% y 5% para los dos años anteriormente nombrados.
120	2002, 2012 y 2013.	• Existe una reducción de un 5% de la función pulmonar en individuos jóvenes sanos. • Se reduce la función pulmonar en niños, adolescentes y jóvenes por estar expuestos a concentraciones entre 120-240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

<=100	2002-2015	• Se incrementa en un 20% las admisiones a centros médicos por enfermedades respiratorias. • Los síntomas en personas asmáticas pueden aumentarse en un 25%. • Aumenta en un 5% los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias. • A concentraciones prolongadas de exposición mayores a 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ existe un incremento de personas con afección pulmonar y nuevos casos por asma.
-------	-----------	---

Fuente. [84, 85, 86]

5.6. Análisis del contaminante criterio NO_2

Para el contaminante criterio NO_2 se estimaron las concentraciones máximas comparándolas con los valores anuales determinados por las GCA de la OMS, las resoluciones 610 de 2010 y 2254 del 2017, además se calculó el promedio aritmético para cada una de las franjas horarias, confrontándolo con el límite máximo permisible para un tiempo de exposición a una hora determinado por los tres documentos anteriormente mencionados. Debido a que no se contaba con el 75% de datos válidos, se decidió no elaborar mapas temáticos. A continuación se muestran las características de las bases de datos de NO_2 en el día sin carro para el periodo seleccionado:

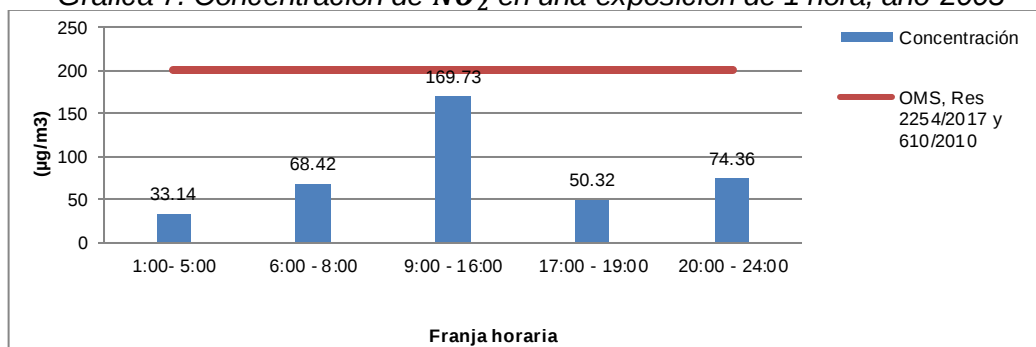
- Para el contaminante criterio NO_2 la estación Alto Rendimiento obtuvo el mayor porcentaje de datos validos con 70.54% seguido de Puente Aranda con 64.29%.
- El año con el mayor porcentaje de datos fue el 2011 con 64.93%.
- El año 2003 no se obtuvo registros en las bases de datos para el contaminante criterio, probablemente por problemas operacionales y técnicos en las estaciones de monitoreo de la RMCAB.
- Las estaciones con la mayor ausencia de datos fueron Cade Energía con 92.86% y Chico Lago con 86.61%, posiblemente por falta de mantenimiento en la infraestructura de las estaciones de monitoreo que conforman la RMCAB.
- En el 2004 solo se reportaron concentraciones en la estación de Suba, por este motivo este año no se tuvo en cuenta para la realización del análisis de este contaminante criterio.

- **Análisis de las gráficas comparativas para NO_2 frente a las GCA de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 desde el año 2002 hasta el 2015**

En un tiempo de exposición de una hora, la franja 3 presentó los valores más elevados en comparación a todas las demás franjas horarias, se destacó el año 2005 por registrar la concentración más elevada con **169,73 $\mu g/m^3$** además por ser el único dentro del periodo de estudio que se acercó al valor de **200 $\mu g/m^3$** establecido por las GCA, las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 (gráfica 7). Mientras que en un tiempo de exposición anual las mayores concentraciones se registraron en la franja 2 para el periodo de estudio, no obstante en los años 2005 y 2015 se presentaron las concentraciones más bajas del gas atmosférico las cuales no excedieron los valores máximos estipulados por los tres documentos anteriormente mencionados en todas las franjas horarias.

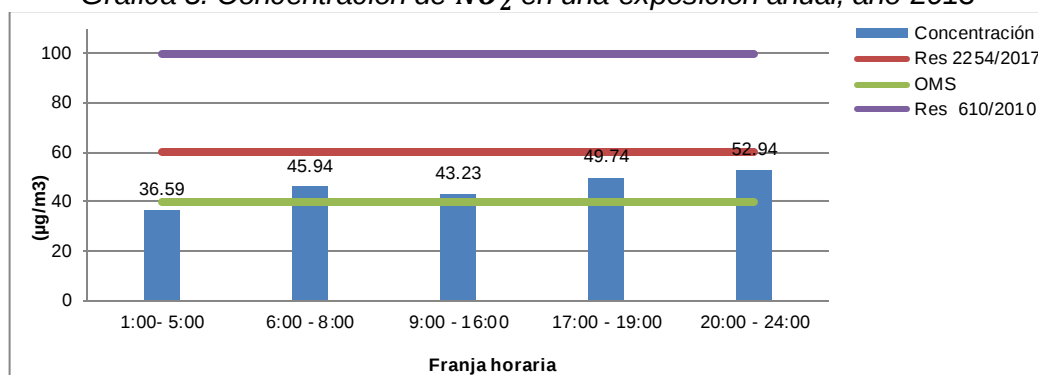
Por otro lado en un tiempo de exposición anual el año 2013 registró la concentración más alta del intervalo de tiempo investigado con **52,94 $\mu g/m^3$** en la franja 5 (gráfica 8); se observó para este año un aumento progresivo de las concentraciones a partir de la franja 3 hasta finalizar la jornada del día sin carro, sobrepasando el nivel determinado por las GCA de la OMS. Las concentraciones de NO_2 tuvieron un comportamiento similar en todos los años del periodo de estudio para un tiempo de exposición a una hora y anual, siendo menores en la franja 1, aumentando progresivamente hasta llegar a la franja 3, y reduciéndose los valores del contaminante atmosférico en las franjas 4 y 5, de igual forma no se observó una disminución del contaminante atmosférico a lo largo de los años del periodo de investigación.

Gráfica 7. Concentración de NO_2 en una exposición de 1 hora, año 2005



Fuente. Autores

Gráfica 8. Concentración de NO_2 en una exposición anual, año 2013



Fuente. Autores

- **Incidencia en la salud por NO_2**

En la tabla 19 se presentan los efectos relacionados con las concentraciones del contaminante NO_2 en el día sin carro, en el periodo de estudio de 2002 a 2015.

Tabla 19. Efectos en la salud por exposición a NO_2

Concentración (µg/m³)	Años	Tiempo de exposición	Efectos a la salud por NO_2
9,4	2002-2015	14 hrs	• En individuos sanos se aumenta la resistencia en las vías respiratorias, además de reacción exagerada del bronquio por estímulos específicos e inespecíficos. • Para un tiempo de exposición anual ninguno de los años sobrepasó el nivel establecido de 40µg/m³ por las GCA de la OMS. Sin embargo, pueden existir efectos tóxicos por la exposición crónica en bajas concentraciones.
4,7	2002-2015	2hrs	• En individuos sanos se aumenta la resistencia en las vías respiratorias.
1,9	2002-2015	2hrs	• En individuos sanos se realiza un cambio en la máxima cantidad de aire que puede ser exhalada de manera forzada después de una inspiración máxima conocida como capacidad vital forzada (CVP). • Se incrementa entre 0% y 109% los casos de enfermedades respiratorias agudas (ERA), a su vez aumenta el riesgo de presentar un enfermedad respiratoria en la población de niños menores de 5 años.
0,9	2002-2015	1h	• Se incrementa la resistencia en las vías respiratorias en individuos con bronquitis crónica.

			En un tiempo de exposición de 1 hora ninguno de los años analizados superó el límite establecido de 200µg/m³ de las GCA de la OMS, indicando una posibilidad de que las políticas ambientales generadas pudieron haber contribuido a la protección en la salud de la población de Bogotá, D.C.
<0.9	2002-2015	20 min	Se reduce la tasa máxima de flujo respiratorio en individuos asmáticos con ejercicios moderado de 10 minutos.

Fuente. [87, 88]

Los efectos negativos en la salud por este contaminante criterio pueden ocurrir por altas y bajas concentraciones, generándose a corto y largo plazo según el tiempo de exposición del individuo, las principales enfermedades y problemas en el organismo asociadas a **NO₂** son enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), obstrucción de las vías pulmonares, cáncer, irritación ocular, bronquitis, reducción de la resistencia a las infecciones respiratorias, neumonía y enfermedades cardiovasculares. Según estudios epidemiológicos se ha demostrado que cerca del 5% a 7% del cáncer de pulmón en personas fumadoras y no fumadoras puede atribuirse a la presencia del dióxido de nitrógeno en la atmósfera, así mismo al **NO₂** se le reconoce 71.000 muertes de niños prematuros en la Unión Europea, de acuerdo a un informe emitido por la Agencia Europea del Medio Ambiente.

Este contaminante atmosférico es uno de los principales percursoros de la lluvia ácida, debido a que reacciona con la humedad relativa y la radiación atmosférica, cuyo producto aumenta la acidez en los ecosistemas hídricos lenticos y loticos reduciendo la población de animales acuáticos además de reducir la visibilidad en los diferentes entornos ambientales, ya que el **NO₂** puede absorber la luz solar y contribuir a la formación de ozono troposférico [89, 90, 91, 92].

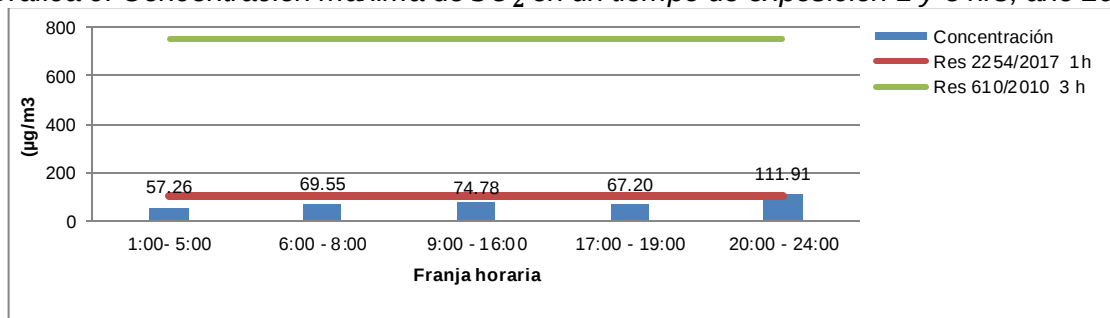
5.7. Análisis del contaminante criterio **SO₂**

En un tiempo de exposición de 24 horas se calcularon las concentraciones promedio de las bases de datos para cada una de las franjas horarias, con el propósito de realizar una comparación con los niveles estipulados por las GCA de la OMS, las resoluciones 610 del 2010 y 2254 del 2017, mientras que para un tiempo de exposición de 1 y 3 horas solamente se contrastó con los valores determinados por las dos normas colombianas mencionadas anteriormente, así mismo por la ausencia mayor del 75% de los datos de las estaciones de la RMCAB, no se elaboraron mapas temáticos para cada una de los años del periodo analizado. Para el contaminante criterio **SO₂** se encontró lo siguiente:

- Las estaciones de Cade Energía con un 9,82% y Usaquéen con 7,44% presentaron el menor porcentaje de datos válidos de las estaciones de la RMCAB para el SO_2 en el día sin carro.
- En el año 2003 no se obtuvieron datos en ninguna de las franjas horarias analizadas para el contaminante criterio SO_2 quizás por daños operativos y de mantenimiento en la RMCAB.
- Para el contaminante criterio SO_2 la estación con mayor información completa fue Carvajal con el 80,65%.
- El año con mayor número de datos fue 2007 con 73,80% para el contaminante atmosférico SO_2 .
- **Análisis de las gráficas comparativas para SO_2 frente a las GCA de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 desde el año 2002 hasta el 2015**

La concentración máxima para un tiempo de exposición de una hora para el periodo de estudio fue registrada en el año 2009 con un valor de **111,91 $\mu g/m^3$** en la franja 5, siendo ésta la única concentración que sobrepasó lo establecido en la resolución 2254 del 2017 (gráfica 9). Sin embargo, para un tiempo de exposición de tres horas ninguno de los valores de SO_2 para cada una de las franjas horarias de todos los años analizados superó el nivel determinado por la resolución 610 del 2010 correspondiente a **750 $\mu g/m^3$** . El contaminante criterio presentó un comportamiento similar en los años de estudio en un tiempo de exposición de una, tres y 24 horas; en la primera franja las concentraciones aumentaron hasta la franja 2, debido al aumento en la movilidad en la ciudad, además de la ruptura de la capa de inversión térmica que permitió la recirculación del SO_2 , en las siguientes franjas 3 y 4 los valores del contaminante disminuyeron, para incrementar en la última franja horaria de 8:00 p.m. a 12:00 a.m. por la circulación de los diferentes tipos de vehículos al terminar la medida del día sin carro.

Gráfica 9. Concentración máxima de SO_2 en un tiempo de exposición 1 y 3 hrs, año 2009

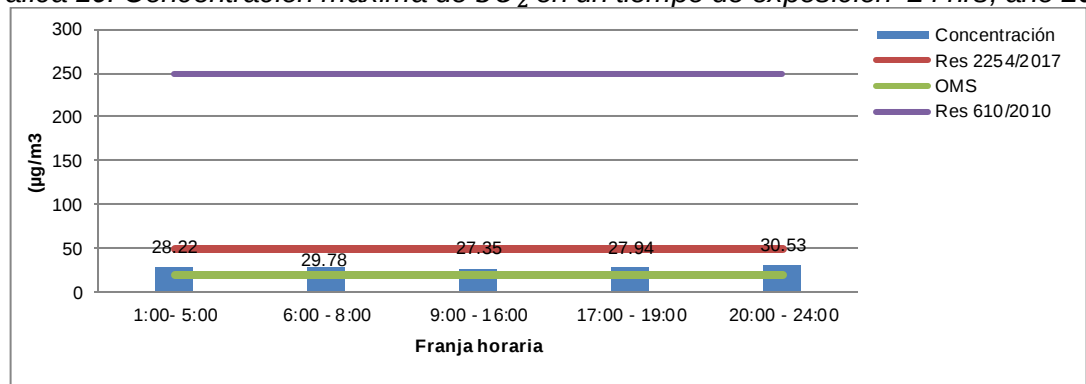


Fuente. Autores

Para un tiempo de exposición de 24 horas el año 2002 presentó las mayores concentraciones del periodo de estudio en las 5 franjas horarias, las cuales superaron los límites establecidos por las GCA de la OMS; el valor más elevado para este año fue **30,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en la franja 5 (gráfica 10). Por otro lado en la mayoría de los años de investigación la franja 2 mostró las concentraciones más elevadas relacionándose a la inversión térmica y a la manera de conducir de los conductores, ya que al acelerar y frenar de manera repentina aumenta el consumo de combustible en el vehículo. El año 2009 se destacó por sobrepasar el valor establecido por las GCA de la OMS en las franjas 1,2, 3, y 5, mientras que los años 2013 y 2015 fueron los únicos dentro del periodo de estudio los cuales no sobrepasaron los límites establecidos por la OMS.

Para el año 2015 ninguna de las franjas sobrepasó los límites máximos permisibles establecidos por la GCA, en las resoluciones 610 de 2010 y 2254 del año 2017, reflejando como la implementación de combustibles más eficientes en los vehículos de carga pesada y transporte público contribuyen a que en este día los niveles de este contaminante sean bajos. Ninguna de las concentraciones de **SO_2** para los años comprendidos entre 2002 a 2015 sobrepasó el valor de **250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** determinado por la resolución de 610 de 2010 siendo menos restrictiva que el nivel máximo permisible estipulado en la resolución 2254 de 2017.

Gráfica 10. Concentración máxima de SO_2 en un tiempo de exposición 24 hrs, año 2002



Fuente. Autores

- **Incidencia en la salud por SO_2**

A continuación, se presentan los efectos asociados a las concentraciones del contaminante **SO_2** en el día sin carro para la ciudad de Bogotá, D.C. en el periodo de estudio de 2002 a 2015 tabla 20.

Tabla 20. Efectos en la salud por exposición a SO_2

Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Años	Efectos a la salud por SO_2
50	Ningún año en el periodo de estudio se encontró en el rango.	En un tiempo de exposición de 24 horas las concentraciones para los años del 2002 hasta el 2015 se encontraron por debajo del umbral establecido por el objetivos intermedio 1 con 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2 con un valor de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, permitiendo la posibilidad que en este periodo de tiempo se presentaran mejoras en la salud
400-900		Puede existir probablemente un aumento en enfermedades respiratorias (tos, irritación de garganta y silbidos en el pecho), de personas que padecen asma.
500-1700		Incremento en problemas respiratorios en personas con asma y un posible agravamiento de las enfermedades pulmonares y cardíacas.
1700-2300		Aumento significativo en problemas respiratorios en personas con asma y agravamiento de las enfermedades pulmonares y cardíacas.
2300-2900		Aumento severo en problemas respiratorios en personas con asma y un riesgo serio de agravamiento de las enfermedades pulmonares y cardíacas.
>2900		Cambios en la función pulmonar y problemas respiratorios en individuos sanos.

Fuente. [93, 94]

El dióxido de azufre es muy peligroso para el sistema respiratorio ocasionando irritación en la garganta, vías respiratorias e irritación ocular, de igual forma puede reaccionar con la humedad de la cavidad nasal y garganta dañando los nervios que se encuentran en el aparato respiratorio, afectando a grupos susceptibles que presenten problemas de asma, bronquitis, EPOC y problemas cardíacos. Además inflama el tracto respiratorio en los seres humanos provocando tos, edemas y secreción de mocos. La literatura ha establecido que los días con mayores concentraciones de SO_2 aumentan las emergencias relacionadas por enfermedades del sistema respiratorio y a lo largo del tiempo se le atribuye el aumento de muertes por problemas cardiovasculares; por otro lado este contaminante criterio se combina con el agua para formar el ácido sulfúrico, el cual junto a NO_2 son los principales componentes de la lluvia ácida que causa la deforestación en el medio ambiente [95, 96].

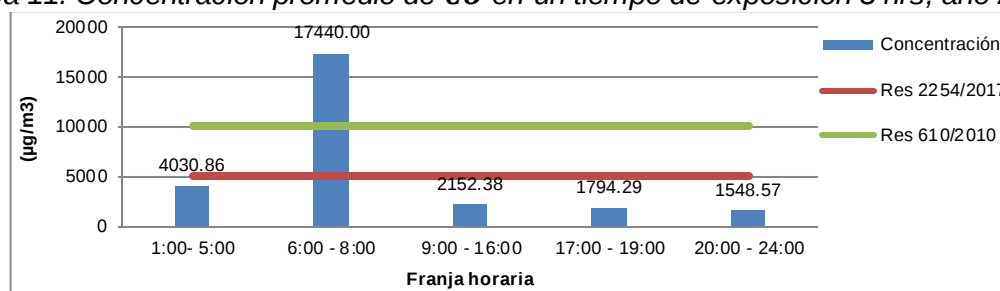
5.8. Análisis del contaminante criterio **CO**

El análisis del contaminante monóxido de carbono se realizó con las concentraciones máximas y promedio calculado para cada una de las franjas seleccionadas en la investigación, comparándose con un tiempo de exposición de 1 y 8 horas, según lo establecido por las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017; no se elaboraron mapas temáticos, debido a la baja calidad de las bases de datos para el **CO** con un porcentaje menor al 75%. En los siguientes puntos se muestran las observaciones encontradas para el contaminante criterio:

- Para el **CO** la estación con mayor información completa es Carvajal con el 72,62% y Centro de Alto Rendimiento con 62,50% correspondiente.
- El año con mayor número de datos fue el año 2012 con 63,99% para el contaminante criterio en el día sin carro.
- Se presenta una ausencia de datos del 85,71% para **CO** en los años 2004 y 2005 posiblemente por errores sistemáticos en la captura de datos por parte de las estaciones de la RMCAB.
- Las estaciones que presentaron una mayor ausencia de información para el periodo de estudio fueron Chico Lago, Tunal y Sagrado Corazón con 92,86%, 86,01% y 85,71% respectivamente.
- **Análisis de las gráficas comparativas para CO frente a las GCA de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 desde el año 2002 hasta el 2015**

Las GCA de la OMS no establecen límites máximos permisibles para este contaminante criterio a una hora y 8 horas de exposición. En un tiempo de exposición de 8 horas las concentraciones más elevadas para el día sin carro se presentaron en el año 2004 en la franja 2 con un valor **17.440 µg/m³** superando los valores máximos estipulados por las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017, en esta franja horaria se presentaron los mayores niveles de **CO** en la mayoría de los años, en comparación a las franjas 1 y 3 en donde se registraron las menores concentraciones del gas atmosférico (gráfica 11). Cabe destacar que los demás años del periodo de investigación no sobrepasaron los límites determinados por las resoluciones a excepción del 2014 que la superó en la franja 3.

Gráfica 11. Concentración promedio de **CO** en un tiempo de exposición 8 hrs, año 2004

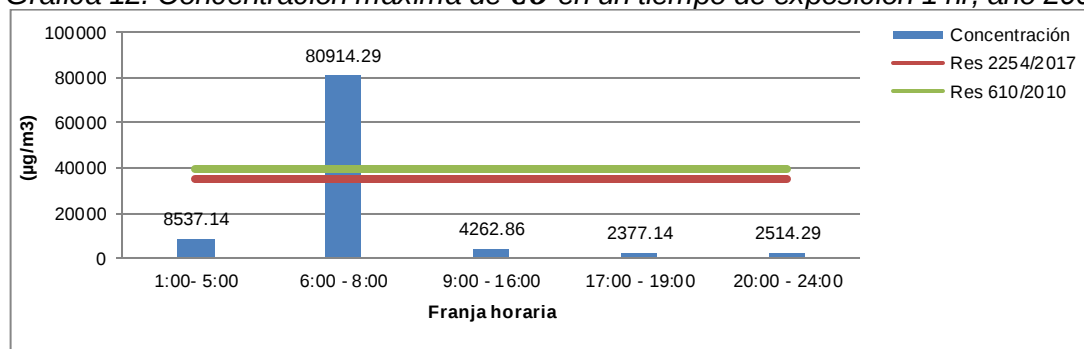


Fuente. Autores

En el año 2015 se presentaron las menores cifras de monóxido de carbono en las horas de la mañana con un rango de **352 µg/m³** a **647,62 µg/m³**, posiblemente se debieron a las adecuaciones en la tecnología vehicular y en el combustible que permitieron la reducción de emisiones contaminantes por el parque automotor público y de carga a lo largo de los años. Se observó que las concentraciones del contaminante criterio aumentaron desde la franja 1 hasta la franja 2, en la franja siguiente se registran los menores valores del contaminante, finalmente se denota un crecimiento hasta finalizar la jornada en los 2 tiempos de exposición.

En los años 2004, 2011 y 2014 se registró la mayor concentración en todos los años de estudio para un tiempo de exposición de una hora, en el 2004 la máxima concentración se registró en la franja 2 con un valor de **80.914,29 µg/m³** superando límite establecido en las resoluciones 610 del 2010 y 2254 de 2017 (gráfica 12), finalmente en el año 2014 las franjas 3 y 4 registraron una concentración mayor a **40.000 µg/m³** mientras que la franja 5 se presentó una concentración menor a la indicada sobrepasando el nivel establecido en la resolución 2254 de 2017.

Gráfica 12. Concentración máxima de **CO** en un tiempo de exposición 1 hr, año 2004



Fuente. Autores

- **Incidencia en la salud por CO**

En la tabla 21 se muestran los efectos en la salud asociados por concentraciones del contaminante **CO** en el día sin carro para la ciudad de Bogotá, D.C., en el periodo de estudio de 2002 a 2015.

Tabla 21. Efectos en la salud por exposición a **CO**

Concentración (µg/m ³)	Años	Tiempo de exposición	Efectos a la salud por CO
57,1	Ningún año en el periodo de estudio se encontró en el rango	8 horas	No hay efectos observables. Sin embargo, puede provocar leve cefalea
		1-8 horas	Cefalea leve, dificultad para respirar y dilatación de los vasos cutáneos.
(342,9- 571,4)	Ningún año en el periodo de estudio se encontró en el rango.	1-2 horas	Dolor de cabeza frontal, taquicardia, náuseas, confusión y pérdida temporal o completa de la sensibilidad.
1128,6	2002-2015	1 hora	Desvanecimiento, convulsiones, debilidad, vómito y desmayo.

Fuente. [97, 98]

El monóxido de carbono afecta el transporte de oxígeno en el aparato respiratorio, debido a que al inhalar el contaminante atmosférico se propaga rápidamente por medio de las membranas alveolares, para reaccionar con la hemoglobina y otras hemoproteínas, causando daños de forma permanente en el cerebro, pulmones o corazón; dado que es un gas que no es percibido por el olfato causa una muerte instantánea por eso es conocido como el “asesino silencioso”. Sin embargo, sus efectos adversos a largo plazo son pocos conocidos. Diferentes estudios epidemiológicos han demostrado la aparición de problemas en la salud relacionados a órganos con alto consumo de oxígeno para su funcionamiento, como lo son los órganos del sistema circulatorio y nervioso, originando enfermedades cardiovasculares como isquemias, la hipertensión arterial, arritmias y problemas neuropsicológicos tales como alteración en el movimiento (Parkinson), déficit de memoria y atención, lo anteriormente mencionado dependerá de la edad de la persona, tiempo de exposición, concentración de **CO**, frecuencia respiratoria entre otros aspectos que inciden en los efectos negativos al organismo [99, 100, 101].

5.9. Análisis de los informes de la SDA frente a los contaminantes criterio

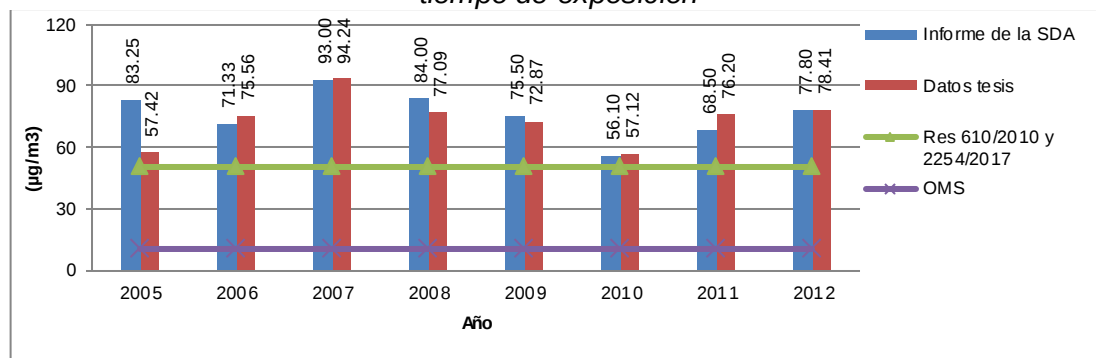
La SDA para el día sin carro elabora un informe sobre los siguientes aspectos, el comportamiento de los contaminantes criterio y monitoreo de la flota vehicular que circula durante la jornada, así mismo a partir del año 2011 se empezó a analizar el comportamiento de las variables climatológicas presentes en este día. En el documento elaborado por la entidad ambiental de Bogotá, D.C., se realiza una comparación de las concentraciones de los contaminantes del aire en el día sin carro frente a un día análogo el cual presenta unas condiciones meteorológicas similares siendo este un martes, miércoles o jueves del mes de febrero. Sin embargo, según lo encontrado en los informes de la SDA el nivel de confianza es bajo, debido a que difícilmente dos días presentan las mismas características

atmosféricas, por otro lado se realiza un análisis con un promedio aritmético de los datos obtenidos de la RMCAB, en periodos de tiempo establecidos para cada uno de los años evaluados de PM_{10} , CO , SO_2 , NO_2 y O_3 .

- **Análisis del PM_{10} en los informes de la SDA desde el año 2005 hasta el 2012**

Para el contaminante criterio PM_{10} se encontró que las concentraciones registradas en los informes de la autoridad ambiental en los años 2005, 2008 y 2009 superaron levemente los valores estimados en la investigación, en comparación a lo registrado en los demás años de estudio, donde los valores observados fueron mayores a los encontrados por la SDA. Los valores de PM_{10} en todos los años del periodo evaluado se encontraron por encima de los niveles estipulados por las Guías de calidad del aire de la OMS y las resoluciones 610 del 2010 y 2254 de 2017 en un tiempo de exposición anual, donde se registraron las cifras más altas en el año 2007 correspondiente a $94,24 \mu g/m^3$ observado en el estudio en contraste con el valor de $93,00 \mu g/m^3$ encontrado en el informe evidenciándose una diferencia mínima. Finalmente no se presentó una reducción del contaminante criterio a través de los años probablemente asociándose a una gran cantidad de flota vehicular de transporte público, especial y de carga con tecnología obsoleta y combustibles de baja calidad que aun circulan dentro de la ciudad (gráfica 13).

Gráfica 13. Concentración de PM_{10} reportado por la SDA frente a datos del estudio en tiempo de exposición



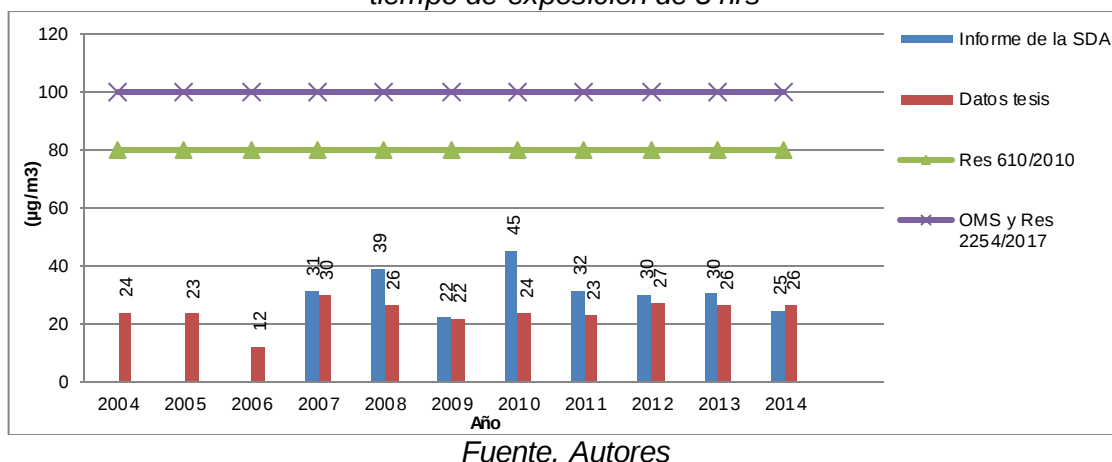
Fuente. Autores

- **Análisis del O_3 en los informes de la SDA desde el año 2002 hasta el 2015**

Para los años 2004, 2005 y 2006 no se encontró un análisis del contaminante criterio O_3 en los informes de la jornada elaborados por la SDA, ninguna de las concentraciones del periodo de investigación sobrepasó los límites propuestos por los GCA de la OMS, las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 en un tiempo de exposición de 8 horas, así mismo el valor más alto se presentó por la autoridad

ambiental con **45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en el año 2010, en comparación con la mayor concentración observada en el estudio con un valor de **30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en el año 2007, probablemente se encuentra asociado a los intervalos de tiempo en el cual este contaminante fue analizado por la autoridad ambiental, incidiendo directamente en el promedio aritmético obtenido, generando un error sistemático. Igualmente se observó una tendencia fluctuante del O_3 entre los años 2002 hasta el 2015 en la investigación realizada y los documentos de la SDA para el día sin carro, relacionándose con el comportamiento de contaminantes precursores como lo es el NO_2 y la presencia de radiación solar, observándose en la franja 3 donde se identificaron las mayores concentraciones de éste gas atmosférico (gráfica 14)

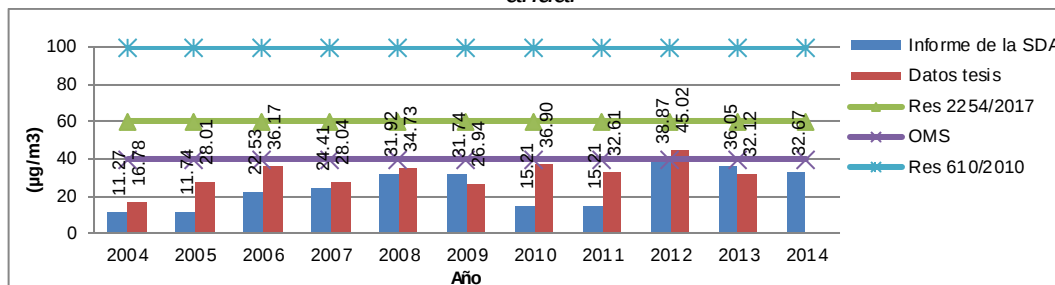
Gráfica 14. Concentración de O_3 reportado por la SDA frente a datos del estudio en un tiempo de exposición de 8 hrs



- **Análisis del NO_2 en los informes de la SDA desde el año 2002 hasta el 2015**

En la investigación el único año que sobrepasó el nivel establecido por las GCA de la OMS fue 2013 con una concentración de **45,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , de igual manera se observó un incremento paulatino del NO_2 en los valores registrados a partir del año 2005 y hasta el año 2014, así mismo las concentraciones para el periodo de estudio se acercaron al valor establecido por la OMS, mientras que ninguno de los datos analizados por la SDA sobrepasó el nivel determinado en las GCA en un tiempo de exposición anual, igualmente se presentó un aumento del contaminante criterio en los informes emitidos para esta jornada. Sin embargo, los valores encontrados por el estudio y los reportes de la SDA no superaron el nivel estipulado por las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 siendo de **100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** y **60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** respectivamente, posiblemente esto se deba a la baja circulación de vehículos de servicio particular con tecnologías y combustibles de modelos antiguos, no obstante aquellas medidas para el seguimiento y el control de las concentraciones del NO_2 en fuentes móviles [102], permiten que los niveles se encuentren por debajo de los límites propuestos por los tres documentos anteriormente mencionados (gráfica 15).

Gráfica 15. Concentración de NO_2 reportado por la SDA frente a datos del exposición anual



Fuente. Autores

- **Análisis del SO_2 en los informes de la SDA desde el año 2002 hasta el 2015**

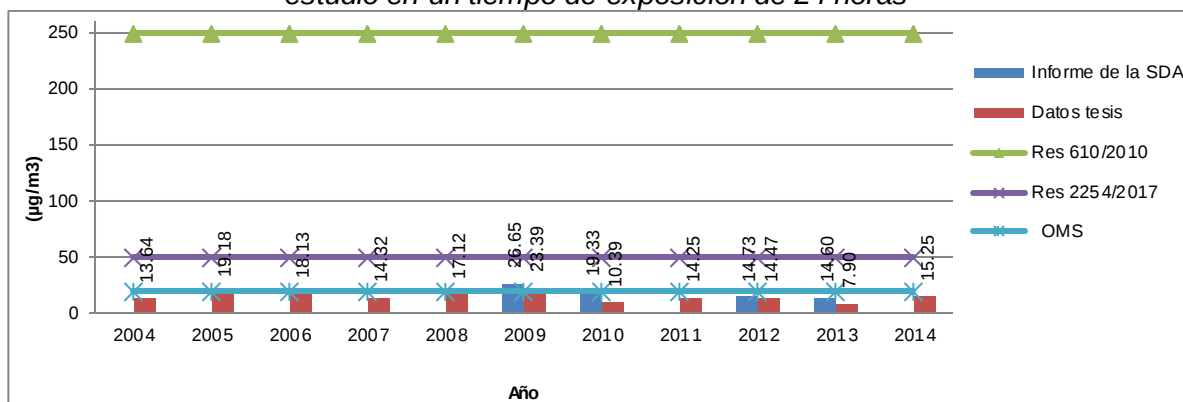
En los informes de la autoridad ambiental solamente se analizaron las concentraciones para los años 2009, 2010, 2012 y 2013, al realizar la comparación en un tiempo de exposición de 24 horas los valores obtenidos en el estudio y en el documento de la SDA en el año 2009 excedieron el nivel establecido por las GCA de la OMS con **26,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** y de **23,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** respectivamente, por otro lado ninguno de los años sobrepaso el límite establecido por la resolución 610 del 2010 y 2254 del 2017 en un tiempo de exposición de 24 horas. Los primeros años del periodo de investigación se registraron altas concentraciones de SO_2 durante la jornada del día sin carro, ya que desde el año 2004 hasta el 2008 el diésel en la flota vehicular contenía altos niveles de azufre entre 1200 ppm a 3000 ppm, a partir del 2009 al 2013 se observó una reducción del contenido de azufre en el combustible hasta alcanzar las 500 ppm generando una disminución en los valores del contaminante criterio, en los años posteriores del 2014 se distribuyó en el país diésel con una concentración menor a 50 ppm. Sin embargo, las concentraciones en el estudio aumentaron posiblemente por los vehículos de servicio público y de carga con tecnología Preeuro, Euro I y Euro II que transitaban por las vías de Bogotá, D.C., en el día sin carro (gráfica 16). A continuación, se presenta el número de vehículos registrados por la SDA en el día sin carro (tabla 22):

Tabla 22. Números de vehículos revisados por la SDA.

Tipo de Vehículo	2008	2009	2012	2013	Total
Público	174	245	124	70	613
Carga	246	338	194	126	904
Público Individual	90	108	12	45	255
Escolares	48	-	13	32	93
Motocicletas	-	-	-	133	133
Oficiales	46	37	-	-	83
Otros		-	74	18	92
Total	604	728	417	424	4346

Fuente. [103]

Gráfica 16. Concentración promedio anual de SO_2 reportado por la SDA vs datos del estudio en un tiempo de exposición de 24 horas

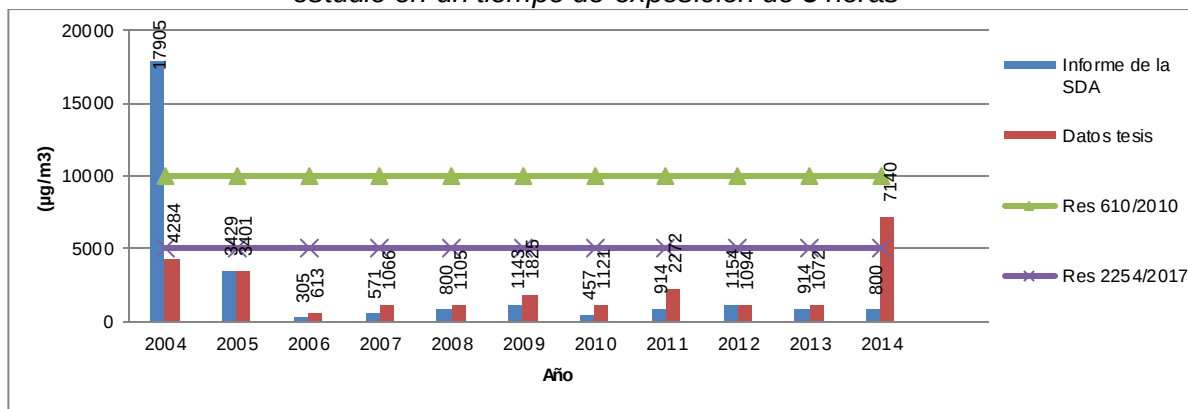


Fuente. Autores

- **Análisis del CO en los informes de la SDA desde el año 2002 hasta el 2015**

Para el contaminante criterio **CO** la concentración más alta fue de **17905 $\mu g/m^3$** en el año 2004 del informe de la SDA, este valor se asocia posiblemente a errores sistemáticos en el procesamiento de la información, mientras que para la investigación el valor más alto registrado se presentó en el 2014 con **7140 $\mu g/m^3$** por otro lado ninguno de los años sobrepaso el nivel establecido por los resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 en un tiempo de exposición de 8 horas, encontrándose por debajo de **5000 $\mu g/m^3$** , de igual forma se evidencio en el transcurso de los años del periodo de estudio una reducción del contaminante, de acuerdo a un estudio realizado en la ciudad de Santiago de Chile la disminución de vehículos sin convertidor catalítico reducen en un 4,7% las emisiones de **CO** (gráfica 17) [104].

Gráfica 17. Concentración promedio anual de **CO** reportado por la SDA vs datos del estudio en un tiempo de exposición de 8 horas



Fuente. Autores

6. IMPACTO SOCIAL

En Colombia los programas de restricción vehicular aplicados en diferentes ciudades como lo es Bogotá, D.C., tienen como objetivo principal disminuir y controlar la contaminación atmosférica, además de mejorar la movilidad, ya que la contaminación del aire es una problemática urbana con costos relacionados en términos de salud pública. El día sin carro permite la movilización de un gran número de vehículos de transporte público, que elevan las emisiones de gases contaminantes y material particulado; de igual manera induce a una fuerte congestión vial, en presencia de automóviles públicos de edad avanzada, generando subproductos por el uso de combustibles fósiles y tecnologías vehiculares obsoletas, causando daños en la salud de la población.

En consecuencia el análisis de los contaminantes criterio en el día sin carro de la ciudad de Bogotá, D.C., permitió identificar su comportamiento en esta fecha, asociada con las variables meteorológicas, factores ambientales, incidencia en la salud de la población de acuerdo a diferentes normas sobre los niveles máximos permisibles en el aire, implementación de las diferentes tecnologías y combustibles de transporte público, que sirve como soporte en la toma de decisiones ambientales y elaboración de nuevas medidas para la disminución de los contaminantes atmosféricos.

Teniendo en cuenta el impacto de la exposición atmosférica posiblemente las fuentes móviles tienen un efecto en (peatones, ciclistas y conductores) debido al contacto directo que se da con los contaminantes producidos por los vehículos de transporte público, en relación con las diferentes tecnologías seleccionadas en los planes de movilidad de la ciudad de Bogotá, D.C. Así mismo, al realizar una comparación de los informes emitidos por la SDA, se analizan las variaciones que se han dado año a año de las concentraciones de los contaminantes del aire y su influencia en la salud de las personas que implementan como medio de transporte para los días sin carro vehículos no automotores, lo cual dependerá del tiempo de exposición y las características anatómicas del individuo.

7. CONCLUSIONES

Las mayores concentraciones para PM_{10} se presentaron en la franja 2, superando lo establecido por los tres objetivos intermedios determinados por las GCA de la OMS, esto incrementó la probabilidad del riesgo de mortalidad en un 6% en un tiempo de exposición anual y en un 1,2% para un tiempo de exposición de 24 horas, donde la estación de Kennedy se destacó con el valor más elevado de **239,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en el día sin carro para el año 2008, la mayoría de años sobrepasaron el límite establecido por las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 en la franja horaria en un tiempo de exposición de larga y corta duración.

En la franja 3 se registraron las mayores concentraciones del gas atmosférico O_3 , su presencia se asocia posiblemente al incremento en la radiación solar, la máxima concentración se registró en el año 2012 con una cifra de **276,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** sobrepasando los niveles establecidos, a comparación de las demás franjas horarias las cuales se encontraron por debajo de lo propuesto por los tres documentos. Los únicos años en donde los valores se encontraron por encima del objetivo intermedio 1 fueron 2002 y 2012 provocando efectos del tipo fisiológico e inflamatorio en los pulmones de adultos jóvenes sanos.

Para el contaminante criterio NO_2 en un tiempo de exposición anual la concentración máxima se registró en la franja 2 con un valor de **52,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** en el 2013, el cual sobrepasó el nivel determinado por las GCA, por otro lado para un tiempo de exposición de una hora la franja 3 presentó las cifras más elevada de NO_2 , resaltando el 2015 con **169,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , siendo el único de los años analizados que se acercó al límite determinado en los tres documentos. Sin embargo, es posible la generación de efectos tóxicos en la población por la exposición prolongada a estas bajas concentraciones.

Las concentraciones más elevadas para los contaminantes CO y SO_2 se registraron en las franjas 2 y 5, de esta manera para un tiempo de exposición de 8 horas el valor más alto de monóxido de carbono se presentó en el 2004 con **17.940 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , mientras que para un tiempo de exposición de 1 hora la cifra más alta observada se registró en el mismo año con **80.914,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** superando la concentración establecida por las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017, la mayoría de los años no sobrepasaron el límite de las dos normas anteriormente nombradas para los dos tiempos de exposición. Para el SO_2 ninguno de los años superó las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 en un tiempo de exposición de 1 y 3 horas, en comparación del tiempo de exposición de 24 horas en donde se caracterizó el año 2002 por presentar la concentración máxima con un valor de **111,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** , sobrepasando los objetivos intermedios 1 y 2 de las GCA de la OMS, en las cuales se propone la elección de vehículos con motores que permitan conseguir mayores reducciones en las emisiones de los niveles del contaminante.

A través de los años se observó un crecimiento de la flota vehicular de servicio de transporte público, privado y de carga en la ciudad de Bogotá, D.C., inscrita en el RDA, donde los mayores valores de vehículos con diésel fueron los buses con un valor de **11.767** en comparación de aquellos que utilizaron gasolina en donde las motocicletas registraron una cifra **103.702** en modelos posteriores a 2014, por otro lado el número de vehículos que conforman el SITM presentaron un aumento al pasar en el año 2002 de **477** a **9742** unidades para el 2015, en este mismo año existió una evolución del parque automotor en los vehículos de carga y de transporte público convencional con la implementación de tecnología Euro IV en comparación de los vehículos del SITM los cuales poseían tecnología Euro V, disminuyendo el número de automotores con tecnologías obsoletas.

La temperatura mínima que se registró en el periodo de estudio fue **6,38 °C** en la franja 1 y la máxima correspondió a **20,65 °C** en la franja 3 en los años 2005 y 2007 correspondientemente. Durante la jornada del día sin carro en la mayoría de los años se presentó un comportamiento en donde la temperatura aumentaba a partir de la franja 2 hasta la franja 3, esto para **PM₁₀**, **NO₂**, **SO₂** y **CO** donde existió una correlación positiva, debido al aumento de la temperatura se incrementaron sus concentraciones paulatinamente, por otra parte el mayor porcentaje de humedad relativa se presentó en la franja 5 en relación a un aumento en las concentraciones de los contaminantes criterio con un valor de **93,20%** para el año 2002, en comparación al menor porcentaje de la misma que se registró en la franja 3 en el 2011 con **43,38%**.

En las franjas 3, 4 y 5 se presentaron picos de precipitación reduciendo los niveles de los contaminantes criterio en el 2006 y 2008, para los otros años los periodos cortos de lluvia no lavaron en su totalidad las partículas resuspendidas. Finalmente, se encontró que las mayores velocidades se registraron entre 3.6 m/s y 8.8 m/s en dirección hacia el sur, suroccidente y sureste de la ciudad posiblemente transportando consigo las partículas de los contaminantes criterio.

En la presente investigación para un tiempo de exposición anual, 8 y 24 horas las concentraciones de los contaminantes criterio **CO**, **SO₂**, **NO₂** y **O₃** analizados, se encontraron por debajo de lo establecido por las GCA de la OMS y las resoluciones 610 de 2010 y 2254 de 2017 para la medida del día sin carro. Sin embargo, el **PM₁₀** registró valores por encima de los tres documentos anteriormente nombrados, igualmente de acuerdo a los mapas temáticos obtenidos se observaron que en localidades de Kennedy, Puente Aranda y Fontibón se localizaron las mayores concentraciones, de igual forma se evidenció el mismo comportamiento en los informes de la SDA, en donde las concentraciones de los contaminantes criterio fueron fluctuantes sin demostrar un aumento o disminución a lo largo de los años; la jornada del día sin carro se toma como una medida educativa, con el propósito de incentivar otros medios de transporte como lo es la bicicleta y vehículos de servicio público.

8. RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda realizar un análisis previo de datos perdidos, con el propósito de conocer las concentraciones registradas en el periodo que se desea evaluar, además de identificar las condiciones de las bases de datos de las estaciones proporcionadas por la RMCAB y así disminuir el sesgo estadístico que se produzca al realizar el análisis de los contaminantes atmosféricos

Con el propósito de analizar los efectos en la salud de la población se recomienda realizar una comparación con otras medidas de protección en la salud pública y estudios epidemiológicos sobre las exposiciones agudas y crónicas a contaminantes criterio en medidas de restricción vehicular, permitiendo de esta manera evaluar las ventajas y desventajas de las políticas ambientales presentes en la actualidad a nivel nacional e internacional para fuentes móviles y su relación con los impactos positivos o negativos que se generen en el medio ambiente.

Para algunos años de la investigación solo se contaba con información de las franjas horarias 3, 4 y 5 de la variable climatológica humedad relativa convirtiéndose en una limitante para la realización de las correlaciones con los diferentes contaminantes criterio generando un análisis segregado además de producir errores sistemáticos.

En el periodo de estudio desde el año 2002 al 2015, los informes generados por la SDA fueron analizados en periodos de tiempo distintos para cada una de las jornadas del día sin carro, se propone realizar los documentos en la misma duración de horas para todos los años, con el propósito de evaluar las mismas condiciones de los contaminantes atmosféricos, además de otros aspectos que permitan analizar el panorama de la jornada para la realización de nuevas políticas públicas, las cuales contribuyan a la calidad del aire y la salud de los ciudadanos en Bogotá, D.C.

Una de las limitantes en la investigación fue la falta de información acerca del número de casos de personas con una enfermedad relacionada al incremento de las concentraciones de los contaminantes criterio para esta jornada, debido a que la población se encontró expuesta a diferentes factores de riesgo, los cuales inciden en su salud sin asociarse a la medida del día sin carro, además dependerá del tiempo de exposición de cada individuo, por otra parte no se obtuvo registro de la cifra exacta de vehículos que transitaron específicamente por las vías de la ciudad durante la medida ambiental, es por esta razón que se tomó el registro de los automotores inscritos en el RDA además de otras fuentes, que permitieran establecer las condiciones de tecnología y combustible, así esta flota vehicular no haya circulado en su totalidad para esta fecha.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDEAM, Informe del Estado de la Calidad de Aire en Colombia 2007-2010, 1st ed. Bogotá, D.C.: IDEAM, 2012, p. 44.
- [2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire. Bogotá D.C., 1st ed. Bogotá, D.C.: Grupo de Comunicaciones - MAVDT, 2010, p. 7.
- [3] L. Mejía, Política para el mejoramiento de la calidad del aire. Bogotá, D.C., 1st ed. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación de Colombia, 2018, pp 4,5.
- [4] N. Peñaloza Pabón, DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL INVENTARIO DE EMISIONES PROVENIENTES DE LAS FUENTES MÓVILES Y FIJAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, D.C., 1st ed. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2010, pp. 55,56.
- [5] Decreto 1098 de 2000, Diario Oficial de Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.bogotajuridica.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=3767>. [Accedido: 28-marzo-2018]
- [6] A. GARCÍA-REYNOSO, M. GRUTTER and D. CINTORA-JUÁREZ, "Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México," Revista Internacional De Contaminación Ambiental, vol. 23, (4), pp. 169-175, 2007. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992007000400002&lng=en&tlng=en.
- [7] C. Ubilla and K. Yohannessen, "CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EFECTOS EN LA SALUD RESPIRATORIA EN EL NIÑO," Revista Médica Clínica Las Condes, vol. 28, (1), pp. 111-118, 2017. . DOI: 10.1016/j.rmcl.2016.12.003
- [8] J. A. Ortega-García, M. Sánchez-Solís and J. Ferrís-Tortajada, "Air pollution and children's health," Anales De Pediatría (English Edition), vol. 89, (2), pp. 77-79, 2018. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2341287918301297>. DOI: 10.1016/j.anpede.2018.04.00
- [9] J. C. Chow et al, "Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards," Journal of the Air & Waste Management Association, vol. 57, (10), pp. 1151-1163, 2007. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3155/1047-3289.57.10.1151>. DOI: 10.3155/1047-3289.57.10.1151.

- [10] National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), 1st ed. US: US EPA (Home), 2014, p. 1.
- [11] J Padgett and H Richmond, "The process of establishing and revising National Ambient Air Quality Standards," *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 33, (1), pp. 13-16, 1983. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6826927>.
- [12] F. Karagulian et al, "Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level," *Atmospheric Environment*, vol. 120, pp. 475-483, 2015. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231015303320>. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.087.
- [13] K. Kim, E. Kabir and S. Kabir, "A review on the human health impact of airborne particulate matter," *Environment International*, vol. 74, pp. 136-143, 2015. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25454230>. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.005
- [14] Oficina Regional de la OMS para Europa, *Dioxido de sulfuro*, 1st ed. Dinamarca: OMS, 2000, p. 1.
- [15] Vedia Izzet and Robert Shorrock, "General," *Greece & Rome*, vol. 62, (1), pp. 123, 2015. Available: <https://search.proquest.com/docview/1672108315>. DOI: 10.1017/S0017383514000321.
- [16] H. T. Nguyen and K. Kim, "Evaluation of SO₂ pollution levels between four different types of air quality monitoring stations," *Atmospheric Environment*, vol. 40, (35), pp. 7066, 2006. . DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.011.
- [17] D. N. Bateman, "Carbon monoxide," *Medicine*, vol. 35, (11), pp. 604-605, 2007. Available: <https://www.clinicalkey.es/playcontent/1-s2.0-S1357303907002691>. DOI: 10.1016/j.mpmed.2007.08.024.
- [18] World Health Organization. Regional Office for Europe, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide : report on a WHO working group, Bonn, Germany 13-15 January 2003," 2003. Available: <http://www.who.int/iris/handle/10665/107478>.
- [19] Basic Information about NO₂, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/ozone-pollution/basic-information-about-ozone> . [Accedido: 28-marzo-2018]
- [20] C. Monn, "Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone," *Atmospheric Environment*, vol. 35, (1), pp. 1-32, 2001.

Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231000003307>.
DOI: 10.1016/S1352-2310(00)00330-7.

[21] M. Alfaro, Contaminación del aire: emisiones vehiculares, situación actual y alternativas, San Jose de Costa Rica, Universidad Estatal de Costa Rica y Ministerio de Ambiente, Energía y desarrollo sostenible, 2001, pp. 14,15,16.

[22] Good, No health impacts are expected when air quality is in this range. and (0-50), "Good No health impacts are expected when air quality is in this range. (0-50),".

[23] P. Salvador, "Ozone, SO_x and NO_x, Particulate Matter, and Urban Air," Encyclopedia of the Anthropocene, pp. 7-21, 2018. Available: <http://www.sciencedirect.com.bdatos.usantotomas.edu.co:2048/science/article/pii/B9780128096659099754>. DOI: <http://doi.org.bdatos.usantotomas.edu.co/10.1016/B978-0-12-809665-9.09975-4>.

[24] IDEAM and Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Rio Bogotá 1st ed. Bogotá. D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2005, pp. 13-14.

[25] P. Shelton, Air properties: temperature and relative humidity, 1st ed. Nebraska: University of Nebraska-Lincoln Extension, 2008, pp. 2-3.

[26] S. Feliu, L. Mariaca, J. Simancas, J. A. González, and M. Morcillo, "Effect of NO₂ and/or SO₂ atmospheric contaminants and relative humidity on copper corrosion," Rev. Metal., vol. 39, no. 4, pp. 279–288, 2003.

[27] Bu Duo;Lulu Cui;Zhenzhen Wang;Rui Li;Liwu Zhang;Hongbo Fu;Jianmin Chen;Huifang Zhang;A.Qiong, "Observations of atmospheric pollutants at Lhasa during 2014-2015 : Pollution status and the influence of meteorological factors," Journal of Environmental Science: English vol. 63, (1), pp. 28-42, 2018. Available: <http://lib.cqvip.com/qk/85265X/201801/674734942.html>. DOI: 10.1016/j.jes.2017.03.010.

[28] Marca conceptual de viento [En línea]. Disponible en: http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/ATLAS/documentos/Marco%20Conceptual_%20Viento.pdf. [Accedido: 27-marzo-2018]

[29] Laura E. Venegas y Nicolás A. Mazzeo, "LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA,".

[30] Secretaria Distrital de Ambiente, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, D.C. 1st ed. Bogotá, D.C.: Subdirección de calidad del aire auditiva y visual, 2018, pp 4,5, 6.

[31] Anónimo. (2016). Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, D.C. –

RMCAB [Online]. Available: <http://ambientebogota.gov.co/>

[32] G. Polichetti. Effect of travel restriction on PM_{10} concentrations in naples: One year of experience. Atmospheric Environment 151pp. 12-16. 2017. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.11.065

[33] G. Invernizzi et al, "Measurement of black carbon concentration as an indicator of air quality benefits of traffic restriction policies within the ecopass zone in Milan, Italy," Atmospheric Environment, vol. 45, (21), pp. 3522-3527, 2011. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231011003645>. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.008.

[34] Y. Wu et al. On-road vehicle emissions and their control in china: A review and outlook. Science of the Total Environment 574pp. 332-349. 2017.. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.040.

[35] S. Zhang et al. Historic and future trends of vehicle emissions in beijing, 1998–2020: A policy assessment for the most stringent vehicle emission control program in china. Atmospheric Environment 89pp. 216-229. 2014. . DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.12.002.

[36] F. Gallego, J. Montero and C. Salas. The effect of transport policies on car use: Evidence from latin american cities. Journal of Public Economics 107pp. 47-62. 2013. . DOI: 10.1016/j.jpubeco.2013.08.007.

[37] V. S. B. Carvalho et al. Air quality status and trends over the metropolitan area of são paulo, brazil as a result of emission control policies. Environmental Science & Policy 47pp. 68-79. 2015. . DOI: 10.1016/j.envsci.2014.11.001

[38] Anónimo. (2013). Informe de la jornada día sin carro. [Online]. Available: http://biblioteca.saludcapital.gov.co/img_upload/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/documentos/Dia_Sin_Carro_2013.pdf

[39] Gutiérrez and E. Olivar, ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE MOVILIDAD, SOCIEDAD Y ECONOMÍA: EL CASO DE BOGOTÁ, D.C. 13th ed. Bogotá, D.C.: Alcaldía mayor de Bogotá, 2000, p. 22.

[40] J. A. Gutierrez and E. A. Olivar, "Algunas reflexiones sobre movilidad, sociedad y economía: el caso de Bogotá, D.C.," 2000.

[41] Anónimo. (diciembre, 2017). Informe de Gestión y Resultados. [Online]. Available: <http://www.secretariageneral.gov.co/>. [Accedido: 27-marzo-2018]

[42] Resolución 2604 del 2009, Diario Oficial de Colombia, 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.bogotajuridica.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=3767>. [Accedido: 22-junio-2019]

- [43] Normativa europea sobre emisiones de vehículos [En línea]. Disponible en: http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/emissions_industrials/normativa_europe_sobre_emissions_de_vehicles/. [Accedido: 27-marzo-2018]
- [44] P. La, C. P. Dalsager, and M. De La Comisión, "Diario Oficial de las Comunidades Europeas," vol. 1, no. 8, pp. 48–1, 2002
- [45] L. A. Comisi and D. E. L. A. S. C. Europeas, "(Texto pertinente a efectos del EEE) LA COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS," no. 2, pp. 46–94, 2003
- [46] Motores Automoción. (21 de diciembre de 2015). FAP, filtro de partículas o DPF. Qué es y lo que debes saber. [Online]. <https://www.marotoautomocion.com/>. [Accedido: 27-marzo-2018]
- [47] Anónimo. (enero, 2015). Historia de las tecnologías de reducción de emisiones contaminantes en vehículos. [Online]. Available: <http://www.vidasostenible.org/>. [Accedido: 27-marzo-2018]
- [48] J. H. Arango, "Calidad de los combustibles en Colombia Quality of Fuels in Colombia," Rev. Ing. , vol. 29, pp. 121–4993, 2009.
- [49] A. Elizondo and T. Hernández Amezcua, "Regulación de las emisiones de CO.sub.2 para vehiculos ligeros en México," Gestión Y Política Publica, vol. 27, (2), pp. 571, 2018.
- [50] M. Gaitán Varón and P. Cárdenas Ruiz, Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas., 1st ed. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017, pp. 59,61.
- [51] E. Marin,H, Gonzales, F. Mejia, "Colombia en la era del alcohol carburante, the time of alchols fuels in Colombia," 20 de agosto de 2008. [Online]. <http://www.redalyc.org/html/3214/321428100014/> [57] J. H. Arango, "Quality of Fuels in Colombia," Rev. Ing. , vol. 29, pp. 121–4993, 2009.
- [52] J. H. Arango, "Quality of Fuels in Colombia," Rev. Ing. , vol. 29, pp. 121–4993, 2009.
- [53] M. Baquero and O. Avila, "Automatización y diseño del sistema mezclador de combustible en vehículos con equipos de conversión a gas natural", Universidad de la Salle, Bogotá, D.C., 2008.
- [54] A. Sarmiento, "Gas Natural Vehicular: Oportunidad para mejorar la calidad de aire en las ciudades," (julio de 2018). [Online]. <https://docplayer.es/98651881-Gas-natural-vehicular-oportunidad-para-mejorar-la-calidad-de-aire-en-las-ciudades-andres-sarmiento-julio-2018.html>. [Accedido: 27-marzo-2018]

- [55] P. V. Arun, "A comparative analysis of different DEM interpolation methods," Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci., vol. 16, no. 2, pp. 133–139, 2013.
- [56] J. Li and A. D. Heap, "Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review," Environ. Model. Softw., vol. 53, pp. 173–189, 2014.
- [57] X. PENG, J. WANG, C. SHAN, H. WANG, Z. LIU, and Y. ZOU, "Corrosion Behavior of Long-Time Immersed Rusted Carbon Steel in Flowing Seawater," Acta Metall. Sin., vol. 48, no. 10, p. 1260, 2012.
- [58] A. J. Pacheco and E. P. Nacional, "Tratamiento Estadístico a la Pérdida e Inconsistencia de Datos del Módulo de Registro Histórico del Sistema de Manejo de Energía del Ecuador del Centro Nacional de Control de Energía - CENACE," pp. 35–43, 1976.
- [59] G. Hernández, D. Moríña, and A. Navarro, "Imputación de valores ausentes en salud pública: conceptos generales y aplicación en variables dicotómicas," Gac. Sanit., vol. 31, no. 4, pp. 342–345, 2017.
- [60] L. F. Restrepo and J. Gonzáles, "From Pearson to Spearman," Rev. Colomb. Ciencias Pecu., vol. 20, no. 2, pp. 183–192, 2007.
- [61] Guías de calidad de aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Actualización mundial 2005, Ginebra, Suiza, 2006
- [62] Resolución 610 de 2010, Diario Oficial de Colombia, 2019. [En línea]. Disponible: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf>.
- [63] Resolución 2254 de 2017. Diario Oficial de Colombia, 2019. [En línea]. Disponible: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96res%202254%20de%202017.pdf>
- [64] "DIARIO OFICIAL", Svrpubindc.imprenta.gov.co, 2019. [Online]. Disponible: <http://svrpubindc.imprenta.gov.co/diario/>. [Accedido: 10- Sep- 2019].
- [65] Secretaria Distrital de Movilidad, "Movilidad en cifras", 1st ed. Bogotá, D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., 2015, pp. 6,8.
- [66] "Observatorio Ambiental de Bogotá, D.C.", Oab.ambientebogota.gov.co, 2019. [Online]. Disponible: <https://oab.ambientebogota.gov.co/esm/temas?v=3&p=21>. [Accessed: 22- Jun- 2019].
- [67] M. Greiff and L. Guzmán, "Observatorio de Movilidad", 1st ed. Bogotá, D.C.: Cámara de Comercio de Bogotá, 2017, pp 35-47.

[68] Instituto Nacional de Seguridad e higiene en el trabajo, Motores diésel: emisión de aerosoles de partículas y gases., 1st ed. Barcelona: Ministerio de empleo y de seguridad social, 2010, pp. 15,16.

[69] Transmilenio, "Transmilenio", Transmilenio.gov.co, 2019. [Online]. Disponible: https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/147553/nuevos_buses_hibridos_refuerzan_alimentacion_en_portal_de_la_80/. [Accedido: 22- Jun- 2019].

[70] Naturgas Asociación Colombiana de Gas Natural, Proyecto de Resolución para Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018. [Online]. Disponible http://www.naturgas.com.co/documentos/2018/C_MADS_EMISIONES.pdf [Accedido: 22-Jun-2019].

[71]El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia y el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, "Desarrollo de una Estrategia para una Política de Vehículos Limpios en Colombia", Instituto de Aire Limpio Centro Mario Molina, Washington D.C., 2019. [Online]. Disponible: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_NOMADculos%20limpios%20en%20Colombia%20a%C3%B1o%202010[Accedido: 22- Jun- 2019].

[72]Resolución 1111 de 2013, Diario Oficial de Colombia, 2019. [En línea]. Disponible:<https://www.bogotajuridica.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=72623>. [Accedido: 22-junio-2019]

[73] Decreto 477 de 2013, Diario Oficial de Colombia, 2019 [En línea]. Disponible: http://oab.ambientebogota.gov.co/resultado_busquedas?AA_SL_Session=6fe05691db9c317edb53f134229b9c9f&x=10615. [Accedido: 22-junio-2019]

[74] K. Blumberg, "REDUCCIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE LA TRANSPORTE MASIVO"., 1st ed. Bogotá, D.C.: El consejo internacional de transporte limpio., 2018, pp. 55,56.

[75]DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), El Censo 2005 dejar ver una nueva realidad demográfica., 1st ed. Bogotá, D.C.: Comunicada de Prensa DANE, 2005, pp. 1,2.

[76] G. Yañez Canal and R. Behar Gutierrez. "INTERPRETACIONES ERRADAS DEL NIVEL DE CONFIANZA EN LOS INTERVALOS DE CONFIANZA Y ALGUNAS EXPLICACIONES PLAUSIBLES"., 1st ed. Bogotá, D.C.: Universidad Industrial de Santander. Colombia., 2009, pp. 55,56

[77] L. A. Issn, "Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm 10 .", César augusto arciniégas suárez 1," no. 34, pp. 195–213, 2012.

- [78] E. Kabirb, S. Kabirc and K. Kim, "A review on the human health impact of airborne particulate matter", *Environment International*, no. 74, pp. 136-143, 2015.
- [80] M. Romero-Placeres, P. Más-Bermejo, M. Lacasaña-Navarro, M.M.T. Rojo-Solís, J. Aguilar-Valdés and I. Romieu, "Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana," *Salud Pública de México*, vol. 46, no. 3, Jun 1, pp. 222-233.
- [81] M.L. Montoya-Rendon, P.M. Zapata-Saldarriaga and M.A. Correa-Ochoa, "PM10 environmental pollution in and around housing and respiratory capacity in Puerto Nare, Colombia," *Revista de salud publica (Bogota, Colombia)*, vol. 15, no. 1, Ene, pp. 103-115
- [82] R. R. Khan and M. J. A. Siddiqui, "Review on effects of Particulates ; Sulfur Dioxide and Nitrogen Dioxide on Human Health," *Int. Res. J. Environ. Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 70–73, 2014.
- [83] OZONO TROPOSFERICO IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), 2019. [En línea]. Disponible: <http://www.meteoaeronautica.gov.co/ozono-troposferico>. [Accedido: 22-junio-2019]
- [84] D. E. L. Aire and E. N. La, "efectos de la contaminación del aire en la salud", 2019 [En línea]. Disponible: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap7.pdf> [Accedido: 05-septiembre-2019]
- [85] H. Riojas and P. Zuñiga. "EFECTOS EN LA SALUD POR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MÉXICO.", 1st ed. Ciudad de México: Instituto Nacional de Salud Pública. Mexico., 2009, pp. 63,67.
- [86] E. En and L. A. Salud, "CAPÍTULO 2 EFECTOS DEL OZONO Y NO₂", 2019 [En línea]. Disponible: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/10539/capitulo2.pdf?sequence=4&isAllowed=y> [Accedido: 05-septiembre-2019]
- [87] E. Martínez, C. Quiroz, and A. Montoya. "Contaminación Atmosférica y Efectos en la salud en la población de Medellín y su área metropolitana", 1st ed. Medellín: Universidad de Antioquia. Colombia., 2007, pp. 17,18
- [88] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. "Diagnóstico Salud de Salud Ambiental", 1st ed. Bogotá, D.C.: Fundación Cardiovascular de Colombia. Colombia., 2012, pp. 83,84,85
- [89] T. Original, "Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H₂O₂, SO₄²⁻ y NO₃⁻ – durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México," no. 2, pp. 81–88, 2013.

- [90] H. Noreña. Determinación de NO₂ atmosférico mediante captadores pasivos y cromatografía de intercambio iónico. Universidad de Antioquia. Antioquia
- [91] M. García G, H. Ramírez S, H. Ulloa G, O. García G, Á. Meulenert P and J. Alcalá G, "Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H⁺, SO₄⁻² y NO₃⁻ durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México", Revista chilena de enfermedades respiratorias, vol. 29, no. 2, pp. 81-88, 2013. Available: 10.4067/s0717-73482013000200004.
- [92] H. Torres, P. Montoya, J. Castaño, "Determinación de NO₂ atmosférico mediante captadores pasivos y cromatografía de intercambio iónico," Ingeniería y desarrollo Vol. 1, no. 25, enero 2009.
- [93] X. Alvarado Zeledón, "Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la población de la Fortuna de San Carlos," Revista Costarricense de Salud Pública, vol. 15, no. 29, Dec 1, pp. 25-34.
- [94] Y. Khaniabadi, S.M. Daryanoosh, P.K. Hopke, M. Ferrante, A. De Marco, P. Sicard, G. Oliveri Conti, G. Goudarzi, H. Basiri, M.J. Mohammadi and F. Keishams, "Acute myocardial infarction and COPD attributed to ambient SO₂ in Iran," Environmental Research, vol. 156, Jul, pp. 683-687
- [95] Y. O. Khaniabadi et al., "Human health risk assessment due to ambient PM₁₀ and SO₂ by an air quality modeling technique," Process Saf. Environ. Prot., vol. 111, pp. 346–354, 2017.
- [96] I. Garcia-Olivé et al., "Asociación entre factores ambientales e ingresos por bronquiectasias en Badalona, Barcelona (2007-2015)," Med. Clin. (Barc.), vol. 150, no. 7, pp. 257–261, 2018.
- [97] F. Koch and D. Frave. "Efectos de la exposición prolongada al monóxido de carbono ambiental en población urbana de riesgo", 1st ed. Cochabamba: Impacto de la contaminación atmosférica en la salud. Bolivia., 2009, pp. 18,19
- [98] Secretaria Distrital de Salud. "Vigilancia epidemiológica, ambiental y sanitaria de la intoxicación aguda por monóxido de carbono intramural en Bogotá, D.C.", 1st ed. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.. Colombia., 2013, pp. 5,9
- [99] ATSDR, "Resumen de Salud Pública Monóxido de carbono," Natl. Tech. Inf. Serv., 2012.
- [100] J. Buitrago and M. Riaño "Occupational risk analysis associated with the presence of carbon monoxide using a graphic system" 15 de junio de 2014 [Online] https://www.researchgate.net/profile/Moeritz_Velasquez_Riano/publication/270052

073_Occupational_risk_analysis_associated_with_the_presence_of_carbon_monoxide_using_a_graphic_system/links/549f6e2e0cf257a635fe752b.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication_detail. [Accedido: 27-marzo-2018]

[101] J. Luis, B. Buitrago, and M. V. Riaño, “Análisis de riesgo ocupacional asociado a la presencia de monóxido de carbono mediante un sistema gráfico Occupational risk analysis associated with the presence of carbon monoxide using a graphic system,” no. June, 2014.

[102] Plataforma por la Calidad del Aire, “Menos coches, más salud”. Barcelona, Unión Europea, FIRMAR, 2017, pp 4,5,6.

[103] Secretaria Distrital de Ambiente. “Informes de Día sin carro”., 1st ed. Bogotá, D.C.:Alcaldía Mayor de Bogotá. Colombia., 2019, pp. 17-25.

[104] M. Bosch, R. Ryan and E. Matamala, “ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE MEDIDAS DE TRANSPORTE EN LAS EMISIONES DE FUENTES MÓVILES”, San José de Costa Rica, Universidad de Chile, Revista Ingeniería de Sistemas, 2001, pp. 94,95.