

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SENSOR TEMTOP M2000C EN LA  
DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 EN UNA ZONA DE LA  
LOCALIDAD DE FONTIBÓN

**SANTIAGO DURÁN CARO**

UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ - 2021

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SENSOR TEMTOP M2000C EN LA  
DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 EN UNA ZONA DE LA  
LOCALIDAD DE FONTIBÓN

**SANTIAGO DURÁN CARO - 064141045**

DIRECTORA:  
ING. PhD ASTRID DEL SOCORRO ALTAMAR CONSUEGRA

UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ - 2021

El trabajo de grado titulado “*EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SENSOR TEMTOMP M2000C EN LA DETERMINACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM 2.5 EN UNA ZONA DE LA LOCALIDAD DE FONTIBÓN*” realizado por el estudiante *SANTIAGO DURAN CARO* con código *064141045* cumple con todos los requisitos legales exigidos por la Universidad Libre para optar al título de Ingeniero Ambiental.

---

Astrid Altamar Consuegra

---

Carlos Edilberto Vivas Gonzáles

---

Sonia Lucila Meneses Velosa

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Ingeniera Astrid del Socorro Altamar Consuegra, por su dedicación y entrega, por la paciencia y comprensión en cada uno de los momentos difíciles por los que se enfrentó el proyecto y sobre todo mi persona. Por mostrar un carácter firme para que el desarrollo de la investigación siguiera buen curso en todo momento. Pero sobre todas las cosas, la fraternidad con la que deja cada enseñanza a cada uno de los futuros profesionales de la Universidad Libre.

A mi familia, por todos los momentos vividos sean de plenitud o de adversidad, ya que cada uno de ellos dejan enseñanzas y valores que son las semillas para cultivar la ética de un profesional. Por cada esfuerzo realizado por ustedes para hacer realidad lo que un joven recién salido del colegio no creía posible. Y por todas las cosas que no pueden ser mencionadas acá debido que tanta dedicación, entereza, amor, paciencia y esfuerzo me dejan sin palabras.

A la ingeniera Mónica Alejandra Cruz Rojas, por estar al tanto en cada momento, y por sus asertivas asesorías e intervenciones, ya que en momentos de dificultad ayudaron a que el proyecto no perdiera el rumbo propuesto.

Al doctor Alfonso Santos Montero, por haber creído en este tipo de investigaciones, por prestar el sensor Temtop M2000C, alma y centro de este trabajo de investigación, porque a pesar de ser un sensor de bajo costo los recursos nos son sencillos de obtener.

Y, por último, dar gracias a un Ser supremo que hace todo esto posible mediante su voluntad. A la universidad Libre por brindar sus espacios y recursos para mi crecimiento profesional. A los profesores e ingenieros que en realidad me marcaron tanto en mi vida personal como académica. Y a las demás personas que influyeron para que hoy esté a punto de ser un Ingeniero Ambiental.

## RESUMEN

La calidad del aire es un fenómeno local que afecta de manera adversa la salud de la población. En Colombia ciudades como Bogotá y Medellín presentan problemas de contaminación atmosférica principalmente debidas al material particulado generado por fuentes móviles y que ocasionan enfermedades de tipo respiratorio y cardiovascular. Los sistemas de vigilancia de calidad del aire a través de equipos automáticos avalados por la Agencia de Protección Ambiental EPA, permite determinar las concentraciones de dichos contaminantes, sin embargo, aún existen en Colombia poblaciones que no cuentan con esta tecnología que demanda altos costos. Es por esto, que recientemente la utilización de sensores de bajo costo ha permitido que la población en general pueda medir la contaminación generada y relacionarlo con los índices de calidad del aire para establecer acciones para el cuidado de su salud. Debido a que estos equipos utilizan diferentes principios para medición es necesario su calibración para encontrar la tendencia en comparación con equipos con procedimientos avalados. Este trabajo, utilizó un sensor Temtop M2000C para determinar la calidad del aire por PM 2.5 y PM10 en un sector de la Localidad de Fontibón, cuyas mediciones fueron comparadas con los datos arrojados por la estación de calidad del aire de Fontibón de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB. Se utilizó el coeficiente de Pearson para determinar la relación existente entre los datos de la concentración de PM2.5 y PM10 del sensor Temtop M2000C y los datos de la estación ubicada en el barrio Villemar de la localidad de Fontibón. Estos valores no representan el porcentaje de confiabilidad del sensor frente a los datos reales de la Secretaría Distrital de Ambiente, si no la asociación en que dicho porcentaje de confiabilidad se encuentra relacionado con los datos distritales. El 75 % de los días medidos arrojaron una correlación mayor a 0.75 para ambas concentraciones, lo que indica una fuerte relación la cual es directamente proporcional con los datos de las concentraciones de PM2.5 y PM10 tomados con el sensor y los datos oficiales. Se realizaron dos ecuaciones de calibración para el sensor, una para PM2.5 y una para PM10,

tomando como variable dependiente para cada una, el promedio diario de las concentraciones de cada contaminante, obtenidos de la estación del distrito, y como variable independiente los promedios diarios del sensor. Los resultados obtenidos fueron aceptables y muestran la utilidad de este tipo de equipos para establecer la tendencia de la calidad del aire.

## **ABSTRACT**

Air quality is a local phenomenon that adversely affects the health of the population. In Colombia, cities such as Bogotá and Medellín have air pollution problems mainly due to particulate material generated by mobile sources and causing respiratory and cardiovascular diseases. The air quality surveillance systems through automatic equipment endorsed by the Environmental Protection Agency EPA, allows to determine the concentrations of these pollutants, however there are still populations in Colombia that do not have this technology that demands high costs. Therefore, recently, the use of low-cost sensors has allowed the general population to measure the pollution generated and relate it to air quality indices to establish actions for their health care. Due to the fact that these equipments use different principles for measurement, it is necessary to calibrate them to find the trend compared to equipments with endorsed procedures. This work used a Temtop M2000C sensor to determine the air quality by PM 2.5 and PM10 in a sector of the town of Fontibon, whose measurements were compared with the data obtained by the Fontibon air quality station of the Monitoring Network. of Air Quality of Bogotá RMCAB. The Pearson coefficient was used to determine the relationship between the PM2.5 and PM10 concentration data from the Temtop M2000C sensor and the data from the station located in the Villemar neighborhood of the town of Fontibon. These values do not represent the reliability percentage of the sensor compared to the actual data from the District Secretary for the Environment, but rather the association in which said reliability percentage is related to the district data. 75% of the days measured

showed a correlation greater than 0.75 for both concentrations, which indicates a strong relationship which is directly proportional to the data on the concentrations of PM2.5 and PM10 taken with the sensor and the official data. Two calibration equations were performed for the sensor, one for PM2.5 and one for PM10, taking as the dependent variable for each one, the daily average of the concentrations of each pollutant, obtained from the district station, and as an independent variable the daily sensor average. The results obtained were acceptable and show the usefulness of this type of equipment to establish the trend of air quality.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	13
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
4. OBJETIVOS.....	22
4.1. OBJETIVO GENERAL .....	22
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
5. ALCANCE.....	23
6. METODOLOGÍA .....	24
6.1. PRINCIPIOS DE MEDICIÓN PARA MATERIAL PARTICULADO.....	24
6.1.1. <i>Sensor Temtop M2000C</i> .....	24
6.1.2. <i>Equipo de referencia.</i> .....	25
6.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM2.5 Y PM10, SEGÚN EL PROTOCOLO DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA PARA CALIDAD DEL AIRE (MADS) 26	26
6.3. CORRELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE LOS CONTAMINANTES OBTENIDAS DEL EQUIPO DE BAJO COSTO Y LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE FONTIBÓN .....	28
6.4. DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA HUMEDAD RELATIVA Y LA TEMPERATURA EN LA CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN ESTUDIO, MEDIANTE LA CALIBRACIÓN DEL SENSOR TEMTOP M2000C, Y POSTERIOR COMPARACIÓN CON LOS ÍNDICES DISTRITALES Y NACIONALES .....	29
7. MARCO REFERENCIAL .....	31
7.1. MARCO TEÓRICO .....	31
7.2. MARCO CONCEPTUAL .....	36
7.3. MARCO LEGAL.....	40
8. DESARROLLO DEL PROYECTO, RESULTADOS, Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	43
8.1. PRINCIPIOS DE MEDICIÓN PARA MATERIAL PARTICULADO.....	43
8.1.1. <i>Sensor Temtop M2000C</i> .....	43
8.1.2. EQUIPO DE REFERENCIA .....	44
8.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM2.5 Y PM10 SEGÚN EL PROTOCOLO DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (MADS)	46
8.2.1. <i>Análisis mensual.</i> .....	47
8.2.2. ANÁLISIS DIARIO.....	49

<b>8.3. CORRELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE LOS CONTAMINANTES OBTENIDAS DEL EQUIPO DE BAJO COSTO Y LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE FONTIBÓN .....</b>	<b>54</b>
<b>8.4. INFLUENCIA DE VARIABLES METEOROLÓGICAS COMO LA HUMEDAD Y LA TEMPERATURA EN LA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM 2.5 EN LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>58</b>
8.4.1. <i>Ecuaciones de calibración.....</i>	<i>58</i>
8.4.1.2. <i>Ecuación para PM2.5:.....</i>	<i>58</i>
8.4.1.3. <i>Ecuación PM10:.....</i>	<i>61</i>
<b>8.4.2. ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE (ICA, IBOCA).....</b>	<b>63</b>
8.4.2.1. <i>Calibración PM2.5 Vs. Datos promedio diario para PM2.5 de la Estación.....</i>	<i>64</i>
8.4.2.2. <i>Calibración PM2.5 Vs. Promedio del rango de horas de estudio diario para PM2.5 de la Estación. ....</i>	<i>65</i>
8.4.2.3. <i>Calibración PM10 Vs. Datos promedio diario para PM10 de la Estación. 66</i>	<i>66</i>
8.4.2.4. <i>Calibración PM10 Vs. Promedio del rango de horas de estudio diario para PM10 de la Estación. ....</i>	<i>67</i>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>10. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>88</b>

### ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 SENSOR TEMTOP M2000C .....	25
FIGURA 2 SISTEMA SIMPLIFICADO DE UNA SOLA PARTÍCULA EN UN CONTADOR ÓPTICO DE PARTÍCULAS .....	43
FIGURA 3 MONITOR ATENUACIÓN BETA PM10, PM2.5 THERMO 5014I .....	45
FIGURA 4 ESQUEMA DEL MONTAJE DE MEDICIÓN. ....	47

### ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CATEGORÍAS Y RANGOS ICA .....	38
TABLA 2 CATEGORÍAS Y RANGOS IBOCA .....	39
TABLA 3 PRUEBA DE SHAPIRO WILK PARA LAS CONCENTRACIONES PM 10, PM2.5, HUMEDAD Y TEMPERATURA .....	55

TABLA 4 ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS PARA TEMPERATURA °C, HUMEDAD RELATIVA %, CONCENTRACIÓN PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Y CONCENTRACIÓN PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .	55
TABLA 5 COEFICIENTE DE PEARSON PARA LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE PM 2.5.	56
TABLA 6 COEFICIENTE DE PEARSON PARA LAS CONCENTRACIONES DIARIAS DE PM 10.	57
TABLA 7 COEFICIENTES DE PEARSON PARA LOS DATOS MENSUALES DE PM 10 Y PM2.5	57
TABLA 8 COEFICIENTES ECUACIÓN PM2.5.	59
TABLA 9 COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN PARA PM10	61
TABLA 10 RESULTADOS DE ICA E IBOCA, PARA PM2.5 EN LOS PROMEDIOS DIARIOS	64
TABLA 11. RESULTADOS DE ICA E IBOCA, PARA PM2.5 EN DURANTE EL RANGO DE 4 HORAS.	65
TABLA 12 RESULTADOS DE ICA E IBOCA, PARA PM10 EN LOS PROMEDIOS DIARIOS	66
TABLA 13 RESULTADOS DE ICA E IBOCA, PARA PM10 EN DURANTE EL RANGO DE 4 HORAS.	67
TABLA 14 COEFICIENTE DE PEARSON ENTRE PM2.5 Y LAS VARIABLES DE ESTUDIO (HUMEDAD Y TEMPERATURA).	74
TABLA 15 COEFICIENTE DE PEARSON ENTRE PM10 Y LAS VARIABLES DE ESTUDIO (HUMEDAD Y TEMPERATURA).	74

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 CÁLCULO DEL ICA	38
ECUACIÓN 2 CÁLCULO DEL IBOCA.	39
ECUACIÓN 3 ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR TEMTOP M2000C PARA PM2.5.	59
ECUACIÓN 4 ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR TEMTOP M2000C PARA PM10.	61

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1 COMPARACIÓN DE PM2.5 DE LOS DATOS DEL SENSOR Y LA ESTACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE	47
GRÁFICA 2 COMPARACIÓN PM10 DE LOS DATOS DEL SENSOR Y LA ESTACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE	48
GRÁFICA 3 COMPARACIÓN PM2.5 DIARIA 10:00 A.M.	49
GRÁFICA 4 COMPARACIÓN PM2.5 DIARIA 11:00 A.M.	50
GRÁFICA 5 COMPARACIÓN PM2.5 DIARIA 12:00 M.	50
GRÁFICA 6 COMPARACIÓN PM2.5 DIARIA 1:00 P.M.	51
GRÁFICA 7. COMPARACIÓN PM10 DIARIA 10:00 A.M.	52
GRÁFICA 8. COMPARACIÓN PM10 DIARIA 11:00 A.M.	52
GRÁFICA 9. COMPARACIÓN PM10 DIARIA 12:00 M.	53
GRÁFICA 10. COMPARACIÓN PM10 DIARIA 1:00 P.M.	53

GRÁFICA 11 DATOS DEL SENSOR TEMTOP M2000C Vs, DATOS DE LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN PARA PM2.5 .....	59
GRÁFICA 12 DATOS DE LA ESTACIÓN FONTIBÓN Vs. DATOS DE LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN PARA PM10 .....	60
GRÁFICA 13 RESULTADOS DE LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN VS. LOS DATOS DE PM2.5 DEL EQUIPO DE REFERENCIA, CON SU RESPECTIVA REGRESIÓN LINEAL .....	60
GRÁFICA 14 DATOS DE LA ESTACIÓN FONTIBÓN Vs. DATOS DE LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN PARA PM10 .....	62
GRÁFICA 15 RESULTADOS DE LA ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN VS. LOS DATOS DE PM10 DEL EQUIPO DE REFERENCIA, CON SU RESPECTIVA REGRESIÓN LINEAL .....	62
GRÁFICA 16 ERROR PM2.5 Vs. HUMEDAD RELATIVA.....	68
GRÁFICA 17 ERROR PM10 Vs. HUMEDAD RELATIVA .....	69
GRÁFICA 18 ERROR PM2.5 Vs. TEMPERATURA.....	69
GRÁFICA 19 ERROR PM10 Vs. TEMPERATURA.....	70
GRÁFICA 20 DISPERSIÓN EN LOS ERRORES DE PM2.5 .....	71
GRÁFICA 21 DISPERSIÓN EN LOS ERRORES DE PM10 .....	71
GRÁFICA 22 CONCENTRACIÓN DE PM2.5 DE LA ECUACIÓN Vs. HUMEDAD RELATIVA .....	72
GRÁFICA 23 CONCENTRACIÓN DE PM10 DE LA ECUACIÓN Vs. HUMEDAD RELATIVA .....	72
GRÁFICA 24 CONCENTRACIÓN DE PM2.5 DE LA ECUACIÓN Vs. TEMPERATURA.....	73
GRÁFICA 25 CONCENTRACIÓN DE PM10 DE LA ECUACIÓN Vs. TEMPERATURA .....	73
GRÁFICA 26 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 10:00 A.M. ....	76
GRÁFICA 27 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 11:00 A.M. ....	77
GRÁFICA 28 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 12:00 M. ....	77
GRÁFICA 29 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 13:00 P.M. ....	78
GRÁFICA 30 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 10:00 A.M. ....	79
GRÁFICA 31 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 11:00 A.M. ....	79
GRÁFICA 32 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 12:00 M. ....	80
GRÁFICA 33 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y HUMEDAD RELATIVA PARA LAS 13:00 P.M. ....	80
GRÁFICA 34 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y TEMPERATURA PARA LAS 10:00 A.M. ....	81
GRÁFICA 35 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y TEMPERATURA PARA LAS 11:00 A.M. ....	81
GRÁFICA 36 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y TEMPERATURA PARA LAS 12:00 M. ....	82

GRÁFICA 37 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM2.5 Y TEMPERATURA PARA LAS 13:00 P.M. .....	82
GRÁFICA 38 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y TEMPERATURA PARA LAS 10:00 A.M. .....	83
GRÁFICA 39 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y TEMPERATURA PARA LAS 11:00 A.M. .....	83
GRÁFICA 40 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y TEMPERATURA PARA LAS 12:00 M....	84
GRÁFICA 41 COMPARACIÓN DIARIA ENTRE PM10 Y TEMPERATURA PARA LAS 13:00 P.M. .....	84
GRÁFICA 42 COMPORTAMIENTO PROMEDIO HORA A HORA DE LA HUMEDAD RELATIVA Y LA TEMPERATURA EN EL PERIODO DE 5 HORAS ESTUDIADO .....	85

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la contaminación del aire es un problema que viene generando graves consecuencias sobre la salud de las personas, los animales y de más seres vivos, esta problemática es de tal magnitud que es uno de los factores asociados a las muertes por afecciones respiratorias. En algunos países, gracias a procesos irregulares en la planeación urbana, se han construido grandes industrias en zonas urbanas con una gran cantidad de población. A esta problemática se le suma la falta de equipos de monitoreo, un criterio de evaluación inflexible y medidas de control pertinentes por parte de las autoridades, arraigando problemáticas causadas por contaminación atmosférica principalmente en países en vía de desarrollo. (Rico, 2018).

En Colombia, gran parte de las mediciones son estáticas y proveen valores promedio; sin embargo, la calidad del aire es variable en todo momento y puede verse afectada por diferentes aspectos como la velocidad del viento, la densidad de población, la distribución de contaminantes y si la ubicación es en interiores o exteriores. En su gran mayoría, las estaciones que monitorean la calidad del aire son de gran tamaño y su instalación y mantenimiento son costosos. (Ríos, 2020),

Según el IDEAM en las grandes ciudades como Bogotá, se evidencia principalmente debido al constante tráfico, densidad poblacional, actividad industrial y demás actividades que aportan mayor número de emisiones y contaminantes, por lo tanto, se implementó un sistema de vigilancia de calidad del aire con el cual se puede realizar un diagnóstico y así establecer las medidas y controles que pertinentes. En el año 2018, las concentraciones de material particulado excedieron el nivel máximo permisible anual en 2 (Carvajal - Sevillana y Kennedy) de las estaciones la Red de Monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB) el 7,9% de las mediciones de PM<sub>2.5</sub> realizadas en la estación de monitoreo Carvajal - Sevillana se ubicaron en categoría Dañina a la Salud de Grupos Sensibles, por otra parte, la estación de

monitoreo Kennedy reportó el 3,8% y 4% de las mediciones en categoría Dañina a la Salud de Grupos Sensibles (IDEAM, 2018).

Sin embargo es claro que esta localidad no es la única que presenta problemas de Calidad del aire, en localidades como Puente Aranda y Fontibon se encuentra un gran número de fuentes móviles y fuentes fijas, que contribuyen al aumento de las concentraciones de los contaminantes, por esta razón, es importante resaltar que la RMCAB es precario, ya que cuenta solo con alrededor de 20 estaciones de monitoreo para una ciudad con una extensión de 1.775 km<sup>2</sup>, 20 localidades y una gran densidad poblacional. Todo esto conlleva a que las decisiones tomadas por parte de las autoridades competentes sean insuficientes para el buen diseño de las medidas de control y mitigación.

Esta situación llevó a la comunidad académica en general, a realizar mediciones de calidad del aire por medio de sensores de bajo costo, con el objetivo de poder llegar a lugares donde es de vital importancia realizar el control de las emisiones ya que los equipos utilizados para este fin suelen ser complejos y costosos, por esta razón, los sensores de bajo costo podrían ser una herramienta que permita la fácil medición de contaminantes y así mismo pueda complementar la red de monitoreo local.

En la actualidad se han presentado en el comercio, estos sensores de bajo costo con rangos de concentraciones diversos, pudiendo ser una alternativa práctica para el monitoreo en los sistemas de vigilancia sobre todo en ciudades en desarrollo. Estos equipos poseen dispositivos para la concentración de gases como los NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, ozono, entre otros; y también otros que monitorean el material particulado. (Rico, 2018).

Ese trabajo busca evaluar el desempeño de la tecnología Low Cost, para dispositivos que monitorean la calidad del aire, con el fin de determinar si estos equipos pueden ser una herramienta útil para que la población en general tenga noción de la calidad del aire en tiempo real de manera eficiente.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La contaminación del aire representa un importante riesgo para la salud humana, debido a que anualmente en el mundo mueren de forma prematura 4.2 billones de personas (Organización Mundial de la Salud, 2016). La OMS asegura que esta tasa de mortalidad es causada por la exposición a material particulado con un radio de 2.5 micrones o menores a este (PM 2.5), el cual está constituido por partículas muy pequeñas, producidas principalmente por los vehículos pesados que utilizan diésel como combustible, y que pueden transportar material muy peligroso para el cuerpo, tales como metales pesados, compuestos orgánicos y virus, afectando de este modo las vías respiratorias.

Por otra parte, la Organización Panamericana de la Salud (OPS), afirma que la contaminación atmosférica es el mayor riesgo ambiental para las Américas, e identifica como los principales contaminantes que afectan la salud, a los materiales particulados de 10  $\mu\text{m}$  o menos, que pueden penetrar profundamente en los pulmones e inducir la reacción de la superficie y las células de defensa (Organización Panamericana de la salud, 2019).

En Colombia murieron alrededor de 10000 personas y se presentaron 67.8 millones de síntomas y enfermedades relacionadas a la mala calidad del aire. Actualmente los informes de calidad del aire realizados por el IDEAM mencionan que el contaminante con mayor potencial de afección en el territorio nacional es el material particulado menor a 2.5 micras, confirmando que en el país los datos que la OMS aporta son de esencial cuidado y de interés nacional. (IDEAM, 2016).

Este es un problema que se presenta mayormente en las zonas urbanas y grandes centros industriales de los países, debido a su alta industrialización y la flota de transporte urbano que necesitan estas grandes ciudades. Por lo anterior las zonas que tienen mayores problemas ambientales por contaminación atmosférica en Colombia son: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Bogotá, el municipio de

Ráquira en Boyacá y la zona industrial de ACOPI en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca). (Instituto de Hidrología, 2012).

Para PM2.5 se encontró que las mayores concentraciones se presentaron en las estaciones Tráfico Sur en Sabaneta, Tráfico Centro en Medellín, Carvajal-Sevillana en Bogotá, Universidad Nacional Facultad de Minas en Medellín y Corporación Lasallista en el municipio de Caldas. (IDEAM, 2018)

Las medidas que toman los gobiernos de Medellín y Bogotá son insuficientes, ya que se limitan a prohibir la circulación de vehículos de tipo privado e industrial por determinados días, en lapsos de tiempo donde los registros de la contaminación alcanzan niveles muy peligrosos. (Valencia & Fonseca, 2019).

Precisamente en la ciudad de Bogotá, desde el año 2018, se han venido arrastrando grandes problemas en cuanto a la contaminación atmosférica concierne, esto se evidencia en la Resolución 831 del 2018 de la Secretaría Distrital Ambiente, la cual, declara la Alerta Amarilla en Bogotá D.C, de acuerdo con el Índice Bogotano de Calidad del Aire, hasta que se considere necesario conforme a los registros de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá (RMCAB), para garantizar la protección de los derechos de la ciudadanía y tomar las decisiones que sean necesarias en eventuales situaciones de emergencia. (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018)

Los instrumentos tradicionales de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real son costosos en términos de instalación y mantenimiento; por lo tanto, estas redes de monitoreo existentes están escasamente desplegadas y carecen de densidad de medición para desarrollar mapas de contaminantes del aire espaciotemporales de alta resolución. (Munir, Mayfield, Coca, Jubb, & Osammor, 2019).

Por lo anterior son muchas las iniciativas de activistas ambientales y de las mismas autoridades industriales las cuales proponen a la ciudadanía y a la población en general, que por medio de sensores asequibles y de bajo costo, sean ellos mismos los que midan la calidad del aire en las zonas que frecuenten, ya sea en lugares

aledaños a sus hogares, o a su campo labores. Lo anterior con el fin de aportar nuevos datos, ayudar al monitoreo, y ampliar las coberturas de estudios a los cuales los entes reguladores no han podido llegar o simplemente no ejercen control. (Semana, 2019).

Sin embargo, la comunidad científica en diferentes estudios, cuestiona la eficiencia de estos sensores de bajo costo, afirma que varias compañías comerciales han empezado a sacar al mercados sensores de bajo costo (SBC), los cuales han sido analizados y comparados con estaciones meteorológicas por la comunidad científica, y sus estudios afirman que los SBC son inestables y frecuentemente son afectados por las condiciones atmosféricas, presentan sensibilidades cruzadas de los compuestos que interfieren y que pueden cambiar el rendimiento de los LCS dependiendo de la ubicación del sitio (Karagulian et al., 2019).

Por otra parte, la poca presencia de equipos de monitoreo de calidad del aire hace que, debido a las diversas condiciones topográficas, meteorológicas y geomorfológicas, que influyen en la concentración o dilución de los diversos contaminantes atmosféricos, los resultados obtenidos no sean extrapolables a la totalidad de una ciudad o región. (IDEAM, 2018), haciendo que la información se incompleta y haya zonas donde los datos de la contaminación del aire no existan.

Lo anterior podría tener solución apoyado en los sensores de bajo costo, en caso tal de que su uso sea eficiente, dando viabilidad a que la comunidad o incluso los mismos entes de control y gubernamentales puedan acceder a nuevos lugares del territorio nacional, complementando la información y posibilitando el diseño de nuevas metodologías y programas para la prevención y mitigación de la contaminación del aire (Franco, M. C. B et al., 2019)

Un estudio realizado en Bogotá, el cual se realizaron monitoreos a la calidad del aire en diferentes zonas de la ciudad mediante diferentes dispositivos de bajo costo, permitió establecer patrones de variables de dióxido de carbono, temperatura y material particulado (Lancheros & Cuesta, 2017). De la misma manera, la ciudad de

Bucaramanga fue objeto de un estudio similar, donde la calidad del aire fue medida con un prototipo, y sensores de bajo costo, los cuales arrojaron un comportamiento fiable en variables tales como temperatura, humedad y presión en condiciones de lluvias intensas o altas temperaturas con una correlación de 0.91, 0.88 y 0.92 respectivamente. Sin embargo, en las pruebas de material particulado, el estudio afirma que la correlación obtenida para este contaminante criterio se puede considerar solo en el campo educativo, ya que su correlación alcanzo un valor solo de 0.68 (Gutiérrez, 2017).

La localidad de Fontibón en Bogotá al estar ubicada a las afueras de la ciudad hace que se convierta en paso obligatorio para que automóviles de todo tipo circulen por sus calles y avenidas, a esto se le suma la industrialización de ciertos sectores de la localidad y que en ella se encuentra el aeropuerto internacional El Dorado. Todo lo anterior permite que la zona sea un punto adecuado para el muestreo, ya que se ha evidenciado en tiempos anteriores emergencias ambientales debido a su mala calidad del aire, alertando a las autoridades de la capital, obligando a que se tomen medidas como el pico y placa ambiental, y la restricción a los vehículos de carga.

La implementación del estudio en esta zona permite:

- Realizar la comparación de los equipos de bajo costo, con los de mayor tecnología, en una zona con fuentes de emisión de material particulado.
- Facilidad y factibilidad de las mediciones.
- Aporte a las mediciones de la calidad del aire de Bogotá para poder generar conclusiones pertinentes para la ciudad.

Los avances recientes en las tecnologías de sensores de contaminación del aire podrían proporcionar información adicional sobre las fuentes cercanas, y podrían apoyar también, a la ubicación de las estaciones de monitoreo regulatorio mejorando el conocimiento de la variación espaciotemporal de los contaminantes del aire y sus efectos asociados a la salud. (Feinberg et al., 2019). Lo anterior da fundamento a las recomendaciones de las autoridades ambientales bogotanas, que tratan sobre el uso de nuevas tecnologías que sean poco costosas, y alternativas,

permitiendo nuevos puntos de vista, y teniendo en cuenta a los habitantes de la ciudad.

### 3. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los niveles de contaminación causada por la alta exposición de material particulado han empezado a generar conciencia en países del medio oriente como China e India, países altamente contaminados debido a su gran actividad industrial. Lo anterior ha motivado la creación de equipos y sensores accesible a la población del común para monitorear de manera masiva el PM 2.5 (definido como PM con tamaños de partícula inferiores a 2,5  $\mu\text{m}$ , es decir, partículas finas) (Liu, Zhang, Jiang, & Chen, 2017).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), plantea que la exposición al material particulado y en general a la contaminación del aire, son la principal causa ambiental de muertes debido a cáncer en humanos. Un estudio reciente de la Carga Mundial de Enfermedades (GBD por sus siglas en inglés), que evaluó 79 factores de riesgo, informó que la exposición a la contaminación del aire del hogar y del ambiente en términos de partículas menores de 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5), se encontraba entre los 8 principales riesgos de GBD en 2015 para ambos sexos (Mazaheri et al., 2018).

Actualmente en nuestro país, debido a las emergencias ambientales originadas por la alta contaminación en el aire con epicentro en las principales ciudades como lo son Bogotá y Medellín, se ha recomendado a la población civil el uso de equipos de bajo costo, para que de esta manera aporten a la medición y control de los contaminantes que los afectan. Sin embargo, es necesario cuestionar la calidad de los datos arrojados por dichos equipos, a comparación de las estaciones de calidad de aire instaladas, cuyos procedimientos se encuentran avalados por Instituciones a nivel mundial y que arrojan mediciones y resultados muy precisos, de acuerdo con un protocolo de funcionamiento implementado en cada país de origen. Aunque se realice la calibración de estos equipos de bajo costo, la incertidumbre restante en las mediciones de los parámetros que hacen parte de la “Identificación de violaciones que afectan Vecindarios” (IVAN por sus siglas en inglés), aún podría causar valores atípicos aparentes en el modelo de predicción, destacando la

necesidad de métodos de integración o calibración más efectivos para aliviar su impacto negativo. (Bi et al., 2020).

Por otra parte, es necesario evaluar y comprender el rendimiento de los sensores de bajo costo para interpretar de manera correcta los resultados y reducir la confusión cuando las mediciones de estos equipos no están de acuerdo con las mediciones de instrumentación de grado regulatorio. Son necesarios estudios sistemáticos de campo para realizar la comparación entre los sensores de bajo costo con aquellos de mayor tecnología para caracterizar el rendimiento del sensor. (Feenstra et al., 2019). Mostrando así la importancia de la comparación y una posible regulación del uso de estos equipos aconsejados para el uso común fomentando la participación ciudadana.

¿Es el sensor de bajo costo Temtop M2000C una herramienta útil para que el ciudadano común pueda realizar mediciones de PM 2.5 eficientes y que contribuyan a un reporte en la veraz calidad del medio ambiente?

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Evaluar el desempeño del sensor Temtop M2000C como complemento a mediciones de calidad de aire por PM 2.5 en un sector centralizado de la localidad de Fontibón.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Establecer los principios de medición de PM 2.5 utilizando el sensor de bajo costo y la estación Villemar de la RMCAB
- Determinar la concentración de PM 2.5 teniendo en cuenta los criterios establecidos en el protocolo de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire.
- Establecer la correlación entre las concentraciones obtenidas por el sensor TEMTOMP M2000C y un equipo de referencia.
- Establecer la influencia de variables meteorológicas como la humedad y la temperatura en la medición de la concentración de PM 2.5 en la zona de estudio.

## **5. ALCANCE**

El proyecto se llevará a cabo en el barrio Villemar de la localidad de Fontibón en la ciudad de Bogotá, en el cual se desarrollarán comparaciones entre los resultados de las mediciones de PM 2.5 y PM10 obtenidas de una estación para el monitoreo de calidad del aire y los datos del sensor Temtop M2000C, con el fin de evaluar el desempeño del SBC. Dichas muestras se tomarán en un periodo de 32 días.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Principios de medición para material particulado

#### 6.1.1. Sensor Temtop M2000C

Para establecer el principio de medición del sensor de bajo costo se revisó el manual del equipo que el fabricante Temtop provee al mercado, en este documento se encontró que funciona mediante un sensor laser de partículas, y un sensor de dióxido de carbono fundamentado en la técnica de infrarrojo no dispersivo NDIR (por sus siglas en inglés). (Temtop, 2020)

El fabricante del sensor Temtop M2000C lo describe de la siguiente manera en el manual del usuario del equipo: “El sensor de calidad del aire multifuncional Temtop M2000C permite tomar una lectura de PM2.5, PM10, partículas, CO<sub>2</sub>, temperatura y humedad. Alimentado por baterías internas de litio recargables de 2200 mAh. El monitor facilita la toma de medidas de una habitación a otra para obtener una visión general de las concentraciones de diversos contaminantes en el hogar, el lugar de trabajo, la escuela, una guardería o cualquier otro lugar.”

Especificaciones:

- Dimensiones: 8.66 \* 2.89 \* 1.47 pulgadas
- Capacidad de la batería: 2200 mAh.
- Duración de la batería: 6 horas.
- Voltaje de entrada: DC 5 V
- Corriente de entrada: 1 A
- Pantalla LCD a color TFT

Rango de medición:

- Rango de medición (PM2.5): 0 ~ 999 µg / m<sup>3</sup>
- Rango de medición (PM10): 0 ~ 999 µg / m<sup>3</sup>
- Rango de medición (CO<sub>2</sub>): 0 ~ 5000 PPM

- Entorno operativo: Rango de temperatura: 0-50 °C / Rango de humedad: 0-90% RH

*Figura 1 Sensor Temtop M2000C*



**Fuente:** Manual del usuario Temtop M2000C.

#### 6.1.2. Equipo de referencia.

Las técnicas de medición pueden ser divididas en cuatro grupos, con marcadas diferencias de costos y desempeño. Estos grupos son: muestreadores pasivos, muestreadores activos (manuales o semiautomáticos), analizadores automáticos y sensores remotos. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

La Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá utiliza equipos automáticos, ya que la información que genera permite evaluar el comportamiento de los contaminantes presentes en la atmósfera, teniendo en cuenta el lugar y el tiempo. También, la confiabilidad de sus datos permite que las autoridades pertinentes

diseñen políticas y estrategias de prevención y control de la contaminación, y para evaluar posteriormente el desempeño de dichas medidas.

Estos equipos automáticos proporcionan mediciones puntuales con alta resolución (promedios horarios o cada 10 minutos), para la mayoría de los contaminantes criterio (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, PST, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>). (MADS, 2010).

Para el caso de material particulado se recomiendan los equipos tipo Beta Gauge (atenuación de radiación beta) o Tapered Element Oscillating Microbalance (microbalanza oscilante de elemento cónico). El analizador Beta toma las partículas suspendidas en un filtro y calcula el peso de las partículas por absorbanza de rayos beta. El coeficiente de absorción depende únicamente de la fuente de rayos beta, no del tipo de material, tamaños o colores de las partículas. Por consiguiente, el peso es determinado por la absorbanza únicamente.

## **6.2. Determinación de la concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, según el protocolo de diseño de sistemas de vigilancia para calidad del aire (MADS)**

La estación para medición de la calidad del aire “Fontibón” perteneciente a la red de monitoreo de la ciudad de Bogotá se ubicada en la azotea de un edificio de 4 pisos localizada en la carrera 96G # 17B-49 en el barrio Villemar en la localidad de Fontibón, en este vecindario existe una fábrica dedicada a la industria textil, un almacén de cadena, y en general es un barrio residencial.

Para la establecer los parámetros, los principios y el lugar de medición con el sensor Temtop M2000C, se tuvo en cuenta los criterios del protocolo de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible para PM<sub>2.5</sub>. Este protocolo presenta variedad de disposiciones para establecer un punto de monitoreo de calidad del aire teniendo en cuenta, la

ubicación geográfica, tipo de tráfico, cantidad de tráfico, y posibles obstáculos a la hora de tomar datos.

Según el protocolo, el sitio donde se encuentra ubicada la estación Fontibón en el barrio Villemar se clasifica como una zona urbana de bajo tráfico vehicular y con edificios que obstruyen la zona

La toma de datos consistió en la medición de calidad del aire por medio de sensor Temtop M2000C, en un lugar próximo a la estación del distrito para este fin, ubicada en la localidad de Fontibón en el barrio Villemar, con el propósito de adquirir datos que se puedan comparar con los oficiales que la Secretaría Distrital de Ambiente hace públicos.

El periodo escogido para el estudio fue de 32 días calendario comprendidos entre el 14 de diciembre del 2020 y el 15 de enero del 2021, teniendo en cuenta las restricciones que debieron ser tomadas por parte de la alcaldía para hacer frente a la situación actual en el orden de la salud pública, y que aun así los datos obtenidos permitan que el estudio se lleve de la mejor manera y que las observaciones que este arroje sean concluyentes.

Estas mediciones consistieron en la toma minuto a minuto, de variables como PM2.5, PM10, temperatura y humedad relativa, en un rango de 4 horas al día comprendido entre las 9:00 a.m. y la 1:00 p.m. con el fin de obtener 240 datos diarios. Este periodo fue seleccionado teniendo en cuenta mediciones que se tomaron previamente durante 15 días con el sensor, para poder determinar en qué momento la calidad del aire presentaba mayor variabilidad en el transcurso de las 24 horas.

Estos 240 datos fueron divididos en 4 (60 por cada hora) y posteriormente promediados, para poder generar una correlación con los datos oficiales de la Secretaría de Ambiente, ya que este los publica de forma horaria.

El análisis mensual se desarrolló promediando primero, los datos horarios de las concentraciones del sensor de bajo costo, y segundo, los datos hora a hora de la

estación, con el fin de obtener un dato diario de PM2.5 y PM10 por cada uno de los equipos, lo que da como resultado una tabla con 32 valores por contaminante tanto para el sensor como para la estación del distrito.

### **6.3. Correlación entre las concentraciones de los contaminantes obtenidas del equipo de bajo costo y la estación de monitoreo de calidad del aire Fontibón**

Para el análisis diario se calculó el coeficiente de Pearson, utilizando el programa Microsoft Excel, mediante una fórmula predeterminada del programa “=Pearson” la cual correlaciona los datos de las variables y determina el valor correspondiente, para el promedio de las concentraciones obtenidas del sensor, con los datos oficiales hora a hora del rango escogido, con el fin de determinar si existía relación entre las concentraciones del equipo Temtop M2000C y de la estación de la alcaldía de Bogotá. Este tratamiento estadístico de los datos también fue desarrollado mediante el programa Excel, por medio de un complemento estadístico, que permite analizar a fondo los datos por medio de la estadística descriptiva.

Por último, con los datos mensuales se calculó el coeficiente de Pearson mensual, para determinar la relación entre los 32 datos de cada variable respectivamente.

Para encontrar las ecuaciones de calibración del sensor Temtop M2000C de PM2.5 y de PM10, se tomó como variables independientes las concentraciones medidas con el equipo de bajo costo, la humedad relativa y la temperatura para los primeros 16 días del periodo de muestreo que se obtenían con los datos oficiales de la Secretaría Distrital de Ambiente, y como variable dependiente las concentraciones de la estación local de los mismos 16 días, y para realizar una validación para la ecuación obtenida se tomaron los días restantes del estudio. Se utilizó la herramienta de regresión en análisis de datos del complemento de Excel nombrado anteriormente, el cual consistía en dar rango a los valores de X (variables independientes) y a los valores Y (variable dependiente), con el fin de que la

herramienta arrojará los coeficientes de las variables independientes y el intercepto en el eje y.

#### **6.4. Determinación de la influencia de la humedad relativa y la temperatura en la concentración de los contaminantes en estudio, mediante la calibración del sensor Temtop M2000C, y posterior comparación con los índices distritales y nacionales**

Con el fin de encontrar una relación con variables independientes como la humedad relativa y la temperatura, y conseguir resultados más confiables del sensor gracias a dicha relación, se realizó una ecuación de calibración para ambos contaminantes con los datos promedio mensuales, en donde se toma como variable independiente la concentración de PM10 y PM2.5 obtenidas de la estación, y como variables independientes, las concentraciones dadas por el sensor, la humedad relativa y la temperatura, estas dos últimas, obtenidas de la estación distrital.

Para medir la eficiencia de esta calibración se tuvieron en cuenta 3 criterios, que se nombrarán a continuación:

- Comparar los datos Calibración Vs. Datos promedio de la Estación Fontibón. En este caso se confrontaron los datos que resultaban de la ecuación para cada contaminante con los datos promedio de la estación tabulados en una tabla, luego se realizó una regresión lineal por Excel por medio de una gráfica de dispersión de los datos.

- ICA

Se calculó el valor del ICA (Índice de Calidad del Aire) para los datos ya tabulados de la estación y de la calibración para ambos contaminantes y se confrontó el valor y el color asignado correspondiente según el valor, en cada uno de los datos, teniendo en cuenta dos situaciones, en la primera se comparó la calibración con los datos de la estación promediados tomando solo las 4 horas de estudio, y la segunda

comparando los datos de la ecuación con el promedio diario de los datos de las 24 horas de la estación Fontibón.

De esta manera se encontró que al calibrar el sensor teniendo en cuenta la humedad relativa y la temperatura los datos de este se hacen mucho más confiables.

- IBOCA

El IBOCA (Índice bogotano de calidad de aire) se calculó teniendo en cuenta las mismas condiciones que el ICA.

## **7. MARCO REFERENCIAL**

### **7.1. Marco Teórico**

Los países de ingresos bajos y medianos poseen cargas sobredimensionadas de contaminación atmosférica. Según las últimas estimaciones de morbilidad muestran la gran importancia que tiene la contaminación del aire en las enfermedades cardiovasculares y las muertes. La OMS estima que, en 2016, aproximadamente el 58% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, mientras que el 18% de las muertes se debieron a enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas, y el 6% de las muertes se debieron al cáncer de pulmón. (OMS, 2019).

#### **Contaminación Atmosférica**

Se define la contaminación atmosférica como la combustión ineficiente de combustibles fósiles o de biomasa; por ejemplo, los gases de escape de los automóviles, los hornos o las estufas de leña, y menciona que en mayor proporción posee orígenes antrópicos. (OMS, 2019).

Los principales efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la salud van desde un aumento de la mortalidad total y por causas respiratorias y cardiovasculares a las alteraciones del funcionalismo pulmonar y otros síntomas, pasando por un incremento en el número de visitas médicas e ingresos hospitalarios.

En el mundo contemporáneo cobra una gran importancia a partir de una serie de episodios que tuvieron lugar en los países industrializados durante la primera mitad del siglo XX. Varias situaciones excepcionales ocurridas durante ese tiempo se tradujeron en un aumento de la mortalidad y la morbilidad, que no dejaron dudas acerca de que los niveles altos de contaminación atmosférica se asocian causalmente con un aumento de muertes tempranas.

La evidencia científica disponible para Bogotá es contundente en demostrar que las condiciones de la calidad del aire en la ciudad representan una seria amenaza para la salud y calidad de vida de su población. El diagnóstico del problema actual de contaminación ha sido posible gracias a que desde el año de 1997 la ciudad cuenta con una moderna red de monitoreo de la calidad del aire operada por la autoridad local en temas ambientales (Secretaría Distrital de Ambiente).

### **Contaminación Atmosférica Urbana.**

La contaminación atmosférica urbana es la que padecen los habitantes de las ciudades. La contaminación del aire en interiores designa la presencia de contaminantes en los espacios cerrados. La causa principal es la combustión ineficiente que se produce por el empleo de tecnologías rudimentarias para la cocción de alimentos, la calefacción y el alumbrado. Existen también contaminantes naturales del aire en interiores, como el radón, y sustancias químicas contaminantes presentes en los materiales de construcción y los productos para la limpieza que también afectan a la salud.

La contaminación atmosférica urbana puede influir de manera considerable en la calidad del aire en interiores, sobre todo en las casas muy ventiladas o en las situadas cerca de fuentes de contaminación. A la inversa, las fuentes de contaminación del aire en interiores pueden ser causa importante de contaminación atmosférica urbana, especialmente en las ciudades donde muchos hogares queman combustibles de biomasa o carbón para calentarse y cocinar. (OMS, 2019).

### **Material Particulado.**

Según la EPA, el Material Particulado en esencia es una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire, que contienen algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín, o el humo, pueden ser lo suficientemente grandes y oscuras como para verlas a simple vista, o tan pequeñas que solo pueden detectarse mediante el uso de un microscopio electrónico.

La contaminación por partículas incluye:

- PM10: partículas que tienen diámetros de, por lo general, 10 micrómetros y menores.
- PM2,5: partículas finas que tienen diámetros de, por lo general, 2,5 micrómetros y menores.

Fuentes de PM:

Estas partículas vienen en muchos tamaños y formas, y pueden estar conformadas por cientos de diferentes químicos. Algunas se emiten directamente desde una fuente, como obras en construcción, caminos sin asfaltar, campos, chimeneas o incendios.

La mayoría de las partículas se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de químicos, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno, que son contaminantes emitidos por centrales eléctricas, industrias y automóviles.

El material particulado contiene sólidos microscópicos y gotas de líquido que son tan pequeños que pueden inhalarse y provocar graves problemas de salud. Las partículas menores a 10 micrómetros de diámetro suponen los mayores problemas, debido a que pueden llegar a la profundidad de los pulmones, y algunas hasta pueden alcanzar el torrente sanguíneo. Las partículas finas PM2,5 son la causa principal de visibilidad reducida en partes de los Estados Unidos, incluidos muchos de los preciados parques nacionales y áreas silvestres. (EPA, 2017).

### **PM 2.5**

El material particulado o PM (por sus siglas en inglés) 2.5, son partículas muy pequeñas en el aire que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros o menos de diámetro. Esto es menos que el grosor de un cabello humano. Este es uno de los seis contaminantes criterio del aire para la U.S. EPA. es una mezcla que puede incluir sustancias químicas orgánicas, polvo, hollín y metales. Estas partículas pueden provenir de los automóviles, camiones, fábricas, quema de madera y otras actividades que comprendan la quema de combustibles fósiles. (OEHHA, 2020)

La EPA, define el PM 2.5 como partículas inhalables finas que tienen diámetros de, por lo general, 2,5 micrómetros y menores. (EPA, 2017).

Las PM2.5, pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo, la exposición crónica a partículas contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón. (OMS, 2019).

- **Métodos para la medición de la calidad del aire.**

- **Muestreo pasivo:**

Este método de muestreo colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un periodo adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos.

- **Muestreo con Bioindicadores:**

Este método implica el uso de especies vivas generalmente vegetales, como árboles y plantas, donde su superficie funge como receptora de contaminantes. Sin embargo, a pesar de que se han desarrollado guías sobre estas metodologías, todavía quedan problemas no resueltos en cuanto a la estandarización y armonización de estas técnicas.

- **Muestreo activo:**

Requiere de energía eléctrica para succionar el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas); dentro de estos últimos,

el más utilizado actualmente es el muestreador de alto volumen “HighVol” (para PST, PM10 y PM2.5).

- **Método automático:**

Estos métodos son los mejores en términos de la alta resolución de sus mediciones, permitiendo llevar a cabo mediciones de forma continua para concentraciones horarias y menores. El espectro de contaminantes que se pueden determinar va desde los contaminantes criterio (PM10-PM2.5, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) hasta tóxicos en el aire como mercurio y algunos compuestos orgánicos volátiles.

- **Método óptico de percepción remota:**

Transmiten un haz de luz de una cierta longitud de onda a la atmósfera y miden la energía absorbida. Con ellos es posible hacer mediciones, en tiempo real, de la concentración de diversos contaminantes. A diferencia de los monitores automáticos, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto determinado en el espacio, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente mayor a 100 m). Los equipos utilizados se conocen como sensores remotos. (Instituto Nacional de Ecología de México, 2012).

- **Coefficiente de Pearson:**

Es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. Es una cantidad que puede ser negativa o positiva que va de 0 a -1 o de 0 a +1. Cero indica ausencia de relación y mientras más cerca de 1, sin importar el signo, mayor es la fuerza de la asociación entre X e Y. En esencia, r mide la dispersión de los puntos en torno a una tendencia lineal subyacente. El coeficiente de correlación se puede calcular para cualquier grupo de datos. Sin embargo, para usar las pruebas de hipótesis es indispensable que al menos una de las variables tenga una distribución Normal. (Dagnino, 2014).

## 7.2. Marco Conceptual

Con el fin de entender el desarrollo del proyecto es necesario tener conocimiento de los términos que serán definidos a continuación:

- **Índice de Calidad del Aire (ICA)**

El Índice de calidad del aire (ICA), permite comparar los niveles de contaminación del aire de las estaciones de monitoreo que conforman un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (Unidades espaciales de referencia), en un tiempo  $t$ , que corresponde al período de exposición previsto en la norma para cada uno de los contaminantes que se está midiendo. (IDEAM, 2012).

- **Sensor de Bajo Costo (SBC)**

Los sensores de bajo costo se han utilizado para recopilar datos de contaminación del aire espacial y temporal en tiempo real. (Munir, Mayfield, Coca, Jubb, & Osammor, 2019).

- **Sensor Temtop M2000C**

Monitor de calidad del aire para PM2.5, PM10, Partículas, Temperatura, CO<sub>2</sub>, y Humedad. (Temtop, 2013).

- **Exposición a un Contaminante.**

Se refiere a la cantidad tiempo y la dosis a la que se enfrenta un individuo en un determinado espacio, de una sustancia que, por la forma de presentarse en el ambiente, pueden ser absorbidas por el organismo y producir en poco tiempo, o a lo largo de los años, efectos dañinos para la salud. (González Domínguez et al., 2008).

- **Emisiones atmosféricas.**

Según la ley 34/2007 de Calidad de Aire y Protección de la Atmósfera, una emisión atmosférica es la descarga a la atmósfera de forma continua o discontinua de materias, sustancias o formas de energías, procedente directa o indirectamente de cualquier fuente susceptible de producir contaminación en la atmósfera.

- **Fuentes de emisión.**

Se considera fuente de emisión al producto, actividad, proceso que genere emisiones a la atmosfera. De acuerdo con la forma en que son liberados los contaminantes al aire, las fuentes de emisión se clasifican en:

- Fuentes fijas cuando las emisiones se generan en un lugar determinado e inamovible (Ej. Industrias).
- Fuentes móviles en las que, por razón de su uso o propósito, las emisiones se generan durante el desplazamiento de la fuente (Ej. vehículos). (Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC, 2018).

- **Riesgo ambiental.**

Se denomina riesgo ambiental a la posibilidad de que por forma natural o por acción humana se produzca daño en el medio ambiente. Sin embargo, desde la perspectiva ISO 14001:2015, el riesgo se define como un efecto de incertidumbre, por lo que implica tanto efectos potenciales negativos como positivos, es decir amenazas y oportunidades.

- **ICA**

Este índice es una cifra única adimensional que agrupa el aporte de los contaminantes atmosféricos medidos a la calidad del aire global. Se genera este índice para determinar la calidad del aire en un día y en una estación de medición determinada. Es preciso resaltar que el ICA es generado especialmente para público en general, sin incluir factores adicionales que pudieran afectar dicha calidad (IDEAM, 2013).

Para clasificar los niveles de riesgo asociados a la contaminación atmosférica, el ministerio los categorizo los valores con un color como se muestra en la **Tabla 1** a continuación.

Tabla 1 Categorías y rangos ICA

Índice de Calidad del Aire			Puntos de corte del ICA						
ICA	Color	Categoría	PM <sub>10</sub> µg/m <sup>3</sup> 24 horas	PM <sub>2.5</sub> µg/m <sup>3</sup> 24 horas	CO µg/m <sup>3</sup> 8 horas	SO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> 1 hora	NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> 1 hora	O <sub>3</sub> µg/m <sup>3</sup> 8 horas	O <sub>3</sub> µg/m <sup>3</sup> 1 hora <sup>(1)</sup>
0-50	Verde	Buena	0 – 54	0 – 12	0 – 5094	0 – 93	0 – 100	0 – 106	.....
51-100	Amarillo	Aceptable	55 – 154	13 – 37	5095 – 10819	94 – 197	101 – 189	107 – 138	.....
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud de Grupos Sensibles	155 – 254	38 – 55	10820 – 14254	198 - 486	190 – 677	139 - 167	245 – 323
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	255 – 354	56 – 150	14255 – 17688	487 – 797	678 - 1221	168 - 207	324 – 401
201 - 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355 – 424	151 – 250	17689 – 34862	798 – 1583	1222 – 2349	208 - 393	402 – 794
301 - 500	Marrón	Peligrosa	425 - 604	251 – 500	34863 - 57703	1584 - 2629	2350 - 3853	394 <sup>(2)</sup>	795 – 1185

Fuente: IDEAM .

Ecuación 1 Cálculo del ICA

$$ICA_p = \frac{I_{alto} - I_{bajo}}{PC_{alto} - PC_{bajo}} \times (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo}$$

Fuente: IDEAM

En donde,

$ICA_p$  Índice de calidad del aire para el contaminante p

$C_p$  Concentración media para contaminante p

$PC_{alto}$  Punto de corte mayor o igual a  $C_p$

$PC_{bajo}$  Punto de corte menor o igual a  $C_p$

$I_{alto}$  Valor del Ica correspondiente al  $PC_{alto}$

$I_{bajo}$  Valor del Ica correspondiente al  $PC_{bajo}$

- **IBOCA**

Para la Secretaría Distrital de Ambiente es un indicador multipropósito adimensional, el cual se calcula con base en la concentración de los contaminantes medidos por la Red de Monitoreo, para un momento y lugar de la ciudad específicos y se basa en el contaminante con mayor afectación a la salud, no obstante, puede ser calculado para cada uno de los contaminantes que se

monitorean en la ciudad. Este índice es calculado a través de la media móvil de concentraciones de 24 horas y tiene como propósito comunicar de forma sencilla, oportuna y clara el riesgo ambiental por contaminación atmosférica y el estado del recurso en la ciudad de Bogotá (SDA, 2017). Cuenta con unos rangos de clasificación similar al ICA tal como se muestra en la **Tabla 2**.

*Tabla 2 Categorías y rangos IBOCA*

Atributos del IBOCA				Rangos de concentración para cada contaminante y tiempo de exposición del IBOCA <sup>1</sup>					
Rangos numéricos	Color	Estado de calidad del aire	Estado de actuación y respuesta	PM <sub>10</sub> , 24h (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> , 24h (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> , 8h (µg/m <sup>3</sup> ) [ppb]	CO, 8h (µg/m <sup>3</sup> ) [ppm]	SO <sub>2</sub> , 1h (µg/m <sup>3</sup> ) [ppb]	NO <sub>2</sub> , 1h (µg/m <sup>3</sup> ) [ppb]
0 - 10	Azul claro	Favorable	Prevención	(0-54)	(0-12)	(0-116) [0-59]	(0-5038) [0.0-4.4]	(0-93) [0-35]	(0-100) [0-53]
10,1 - 20	Verde	Moderada	Prevención	(55-154)	(12.1-35.4)	(117-148) [60-75]	(5039-10762) [4.5-9.4]	(94-198) [36-75]	(101-188) [54-100]
20,1 - 30	Amarillo	Regular	Alerta Amarilla	(155-254)	(35.5-55.4)	(149-187) [76-95]	(10763-14197) [9.5-12.4]	(199-486) [76-185]	(189-677) [101-360]
30,1 - 40	Naranja	Mala	Alerta Naranja	(255-354)	(55.5-150.4)	(188-226) [96-115]	(14198-17631) [12.5-15.4]	(487-797) [186-304]	(678-1221) [361-649]
40,1 - 60	Rojo <sup>2</sup>	Muy Mala	Alerta Roja <sup>1</sup>	(355-424)	(150.5-250.4)	(227-734) [116-374]	(17632-34805) [15.5-30.4]	(798-1583) [305-604]	(1221-2349) [650-1249]
60,1 - 100 <sup>3</sup>	Morado	Peligrosa	Emergencia	(425-604)	(250.5-500.4)	(734-938) [374-938]	(34806-57703) [30.5-50.4]	(1584-2630) [605-1004]	(2350-3853) [1250-2049]

**Fuente:** IDEAM

*Ecuación 2 Cálculo del IBOCA*

$$IBOCA_p = \left[ \frac{I_{mayor} - I_{menor}}{C_{mayor} - C_{menor}} (C_p - C_{menor}) + I_{menor} \right]$$

**Fuente:** Secretaría Distrital de Ambiente

Donde:

IBOCA<sub>p</sub> = índice para el contaminante p.

C<sub>p</sub> = Concentración medida para el contaminante p (debe estar en unidades de µg/m<sup>3</sup>).

C<sub>mayor</sub> = Concentración mayor o igual a C<sub>p</sub>.

Cmenor = Concentración menor o igual a Cp.

Imayor= Valor del IBOCA correspondiente al Cmayor.

Imenor = Valor del IBOCA correspondiente al Cmenor.

- **Redes de monitoreo de calidad del aire.**

Las redes de monitoreo de calidad del aire tienen como objetivo distinguir entre áreas donde los niveles de contaminantes exceden los límites máximos admisibles por la normatividad vigente y aquellas áreas donde no lo hacen. Dado que las normas ambientales al respecto de calidad del aire se fundamentan en los impactos negativos de la mala calidad del recurso sobre la salud humana, al evidenciar niveles que excedan los máximos permisibles se supone debe la autoridad ambiental intervenir y generar estrategias y regulaciones para la reducción necesaria de tales niveles de contaminación. (Roncancio, 2019).

### **7.3. Marco Legal**

La legislación vigente a nivel nacional para el elemento aire y la prevención de la contaminación en este, está regida por:

- Constitución Política de 1991. La cual dispone en el artículo 79, que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines” (Título II, Artículo 79, Constitución política de Colombia 1991).
- Resolución 610 de 2010 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Por la cual se adopta medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del Aire en el Distrito Capital. Clasifica a las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy, como áreas-fuente de contaminación alta, Clase I, por material particulado menor o igual a 10 micras (PM10). Ordena al DAMA, la adopción de medidas pertinentes para reducir los niveles

de contaminación y establece una restricción vehicular. Ordena al IDU, a la Secretaría de Obras Públicas y a la EAAB incluir el criterio ambiental, para priorizar la ejecución de las obras de infraestructura relacionadas con la malla vial y de acueducto y alcantarillado de la ciudad, en las zonas clasificadas como áreas-fuente de contaminación alta, antes determinadas.

- Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo. Por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana.

A nivel distrital se presentan la siguiente legislación vigente:

- Resolución Conjunta 2410 de 2015 Secretaría Distrital de Ambiente. Por la cual se adopta el Índice Bogotano de Calidad del Aire IBOCA, para la definición de niveles de prevención, alerta o emergencia por contaminación atmosférica en Bogotá; el cual operará como indicador para la gestión y articulación de las acciones conjuntas entre los sectores de ambiente y salud. Establece definiciones, rangos de emisión; cálculo, pronóstico, zonificación; crea la Mesa Permanente del Índice Bogotano de Calidad del Aire IBOCA; implementación de la estrategia pedagógica de recomendaciones en salud y mantenimiento o mejora de la calidad del aire por parte de las Secretarías Distritales de Ambiente y Salud.
- Resolución 831 de 2018 Secretaría Distrital de Ambiente. La cual se declara la Alerta Amarilla en Bogotá D.C, de acuerdo con el Índice Bogotano de Calidad del Aire, hasta que se considere necesario conforme a los registros de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá (RMCAB), para garantizar la protección de los derechos de la ciudadanía y tomar las decisiones que sean necesarias en eventuales situaciones de emergencia.

- Resolución 888 de 2018 Secretaría Distrital de Ambiente. Por medio de la cual se declara finalizada la declaratoria de alerta amarilla en el Distrito Capital ordenada mediante Resolución No. 00831 del 24 de marzo de 2018.
- Resolución 678 de 2020 Ministerio del Medio Ambiente. Por la cual se declara la Alerta Amarilla en el perímetro urbano de Bogotá D.C., y adopta medidas para garantizar los derechos de la ciudadanía, teniendo en cuenta el resultado de estado regular en la calidad del aire en la ciudad.

## 8. DESARROLLO DEL PROYECTO, RESULTADOS, Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

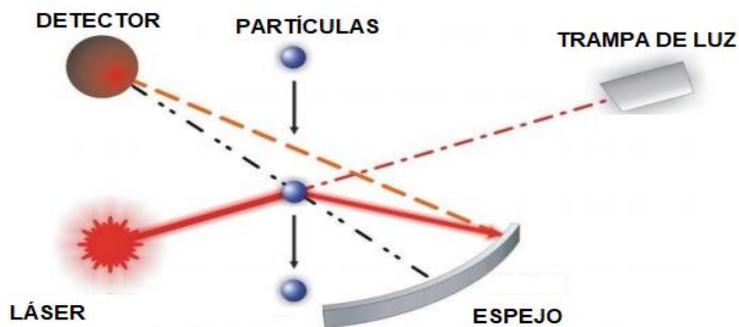
### 8.1. Principios de medición para material particulado

Los sensores de bajo costo surgen principalmente, con el fin de controlar la exposición a la contaminación atmosférica, del personal de plantas en donde se hace necesario este monitoreo. Por esta razón, en la actualidad se encuentran equipos Low Cost que contienen dispositivos con la capacidad de detectar gases contaminantes como gases Nitrogenados (NOx), gases sulfurados (SOx), Ozono (O3), entre otros; material particulado (PM2.5 y PM10), y metales pesados como el Plomo (Pb). (Rico, 2018).

#### 8.1.1. Sensor Temtop M2000C

Su funcionamiento se basa en el monitoreo de la calidad del aire mediante un sensor laser para la detección de partículas (Dagmar 2004) basados en un principio lumínico, ya que las partículas al ser cuerpos sólidos impiden el paso de la luz, estas pasan por un contador óptico de partículas ubicado en un haz de luz. Después, al pasar por este lugar la luz se dispersa, y se refleja a un espejo el cual está enfocado en un detector (Joshua S, 2020).

*Figura 2 Sistema simplificado de una sola partícula en un contador óptico de partículas*



**Fuente:** Joshua S. (2020).

Esta tecnología, permite una medición casi al instante, y un conteo de partículas que poseen el tamaño necesario como para lograr dispersar la luz. Sin embargo, una de las problemáticas más grandes de esta tecnología, se presenta cuando las concentraciones de material particulado son altas, ya que al entrar al sensor y pasar por el láser, el detector las cuenta como una sola partícula, lo que resulta en un error sistemático en el conteo del material particulado (Joshua S, 2020).

Según Joshua (2020), otro problema que se presentan en los sensores de bajo costo que funcionan por medios ópticos, radica en la suciedad que el espejo y el detector pueden recoger a través del tiempo. El autor propone como una solución parcial, el “uso de flujo envolvente” con el fin de encapsular las partículas que generan esta interferencia y limpiar el sensor.

#### 8.1.2. Equipo de referencia

Las muestras que toman los equipos automatizados pueden ser analizadas en línea usualmente por métodos electro-ópticos (Absorción UV, Infrarrojo no dispersivo, fluorescencia o quimioluminiscencia) y de esta manera la Secretaría Distrital de Ambiente por medio de los medios digitales de la RMCAB, publica los datos obtenidos en tiempo real para el conocimiento de la ciudadanía en general.

Según el Ministerio de Ambiente es necesario para la obtención de datos exactos u confiables, “un estándar alto de mantenimiento y operación” y también, “un programa de aseguramiento y control de calidad altamente eficiente. Estos analizadores automáticos, permiten implementar estrategias que tengan como base la medición continua ya que tienen un cubrimiento amplio en rangos de tiempo y espacio considerablemente amplios (MADS, 2010).

El equipo utilizado en las Estaciones de Calidad del Aire de RMCAB es el de atenuación Beta, el cual consiste en la recolección de una muestra de partículas en una cinta que hace las veces de un filtro, a medida de que se depositan las partículas que ingresan en un caudal de aire conocido, se logra una acumulación de partículas que es irradiada por un elemento radioactivo como carbono 14, el cual

emite electrones de alta energía (rayos beta) por lo que la atenuación de la señal de radiación es empleada para determinar la masa de las partículas que se depositan en la cinta. Este equipo se muestra en la Figura 3.

Figura 3 Monitor Atenuación Beta PM10, PM2.5 Thermo 5014i



**Fuente:** Thermo, 2021.

Estos equipos tienen como características generales la medición en tiempo real, capacidad de transmitir datos, en rangos horarios arrojando mediciones puntuales y precisas.

Realizando una comparación entre los dos equipos utilizados, el equipo de atenuación beta arroja valores horarios dado que para tiempos menores son menos seguros (Joshua S. 2020) y utilizan equipos para mantener la temperatura en ciertas condiciones que no permita la condensación excesiva de vapor de agua, en cuanto el sensor de medición utilizado no está acondicionado para despreciar los efectos de la temperatura y humedad relativa y los datos obtenidos a tiempos menores de 1 hora que involucran la necesidad de promediar los datos establecen grandes diferencias entre las mediciones realizadas por los dos equipos. Y como se explicó anteriormente los equipos que utilizan métodos ópticos pueden leer un conjunto de partículas como una sola y por ende se presume que concentraciones menores para el compuesto.

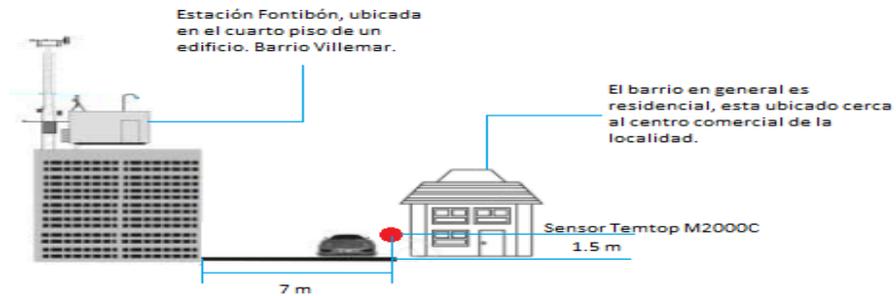
Sin embargo, la literatura (Joshua S. 2020) establece que las diferencias entre los sensores de bajo costo pueden tener resultados precisos, pero también es necesario determinar si algunos otros factores hacen que dichos resultados puedan variar, en este estudio se determinó que la temporada (invierno o verano) influye en que los resultados se encuentren por encima o por debajo de los equipos de referencia con que se calibra y cuyo método de medición está avalado por patrones internacionales. El estudio realizado en esta investigación se realizó en temporada seca y coincide con los resultados de este estudio en los cuales los datos de concentración de material particulado fueron subestimados es decir menor que los arrojados por el equipo de referencia.

## **8.2. Determinación de la concentración de PM2.5 y PM10 según el Protocolo de Diseño de Sistemas de Vigilancia de calidad del aire (MADS)**

El barrio Villemar es principalmente un barrio urbano, con algún comercio sectorizado sobre su vía principal, es un comercio basado en pequeños restaurantes y tiendas de víveres, existe una fábrica dedicada a sector textil ubicada de forma contigua al edificio de la estación, y en general este barrio se encuentra justo al lado al centro de la localidad, donde si existen variedad de comercio, y un alto flujo vehicular.

Po lo anterior, según el protocolo, el sitio donde se encuentra ubicada la estación Fontibón en el barrio Villemar se clasifica como una zona urbana de bajo tráfico vehicular y con edificios que obstruyen la zona, por esta razón se realizó el montaje del equipo de bajo costo en la acera del frente a 7 metros de este como lo aconseja el protocolo. La altura del montaje debe ser para la zona escogida de dos metros, sin embargo, debido a dificultades en el sitio y para obtener de manera fácil la lectura del sensor, este se ubicó a 1.5 metros del suelo.

Figura 4 Esquema del montaje de medición.



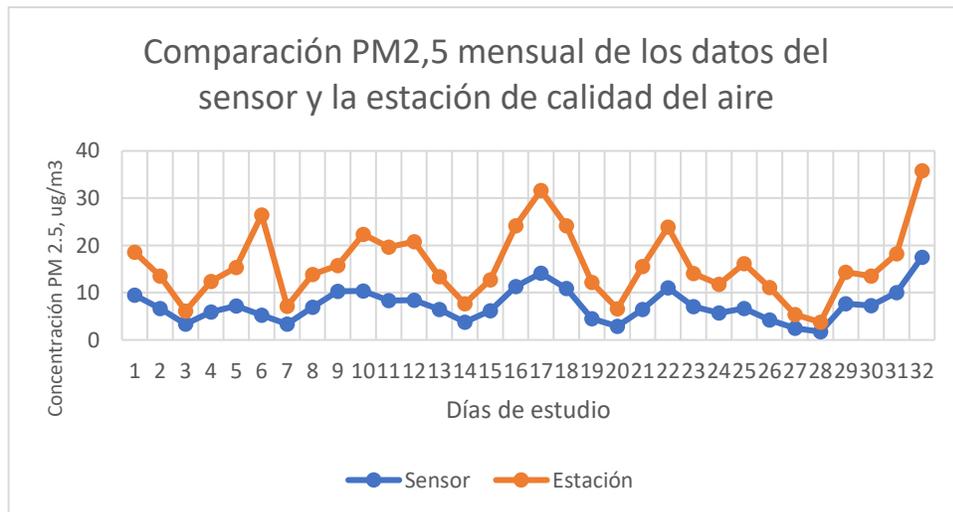
Fuente: Autor.

En el primer piso del edificio funciona un almacén de cadena, y una oficina del archivo de Bogotá, pero se encuentra rodeado mayormente por casas, por esta razón no se encuentra un sitio exacto donde se puedan seguir a cabalidad las pautas establecidas por el protocolo.

Con el fin de evaluar el desempeño del sensor en diferentes escenarios se realizó un análisis diario y uno mensual.

### 8.2.1. Análisis mensual.

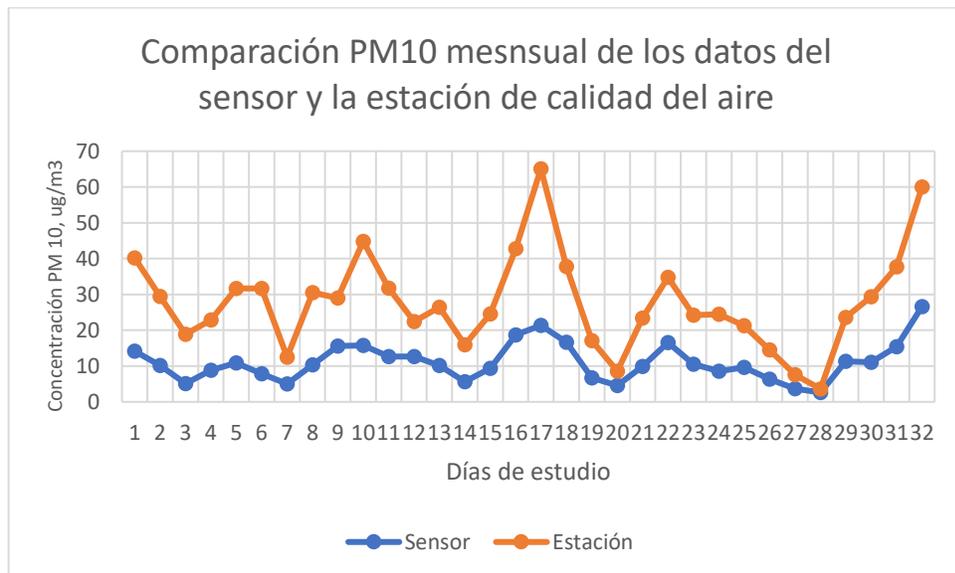
Gráfica 1 Comparación de PM<sub>2.5</sub> de los datos del sensor y la estación de calidad del aire del aire



**Fuente:** Autor.

En la **gráfica 1** se muestra la tendencia de los promedios diarios de las 4 horas, del rango de estudio de las concentraciones de PM2.5. durante los 32 días, en primer lugar, se observa que el comportamiento de ambos equipos es similar, es decir, cuando la concentración aumenta o disminuye, lo hace para ambos equipos, a excepción del día 6, esto se debe a que para ese día los datos obtenidos de la estación Fontibón presentaron concentraciones del contaminante mucho mayores a las medidas por el sensor. También se muestra que los promedios del sensor de bajo costo en todo momento poseen valores menores a los del equipo de referencia, mostrando así, un comportamiento regular en sus mediciones, Por último, cabe aclarar que cuando las concentraciones presentan valores más bajos, los datos del sensor se encuentran más cercanos a los datos de la Secretaría de Ambiente, presentando un mejor comportamiento que en los días con las concentraciones más altas.

*Gráfica 2 Comparación PM10 de los datos del sensor y la estación de calidad del aire*



**Fuente:** Autor.

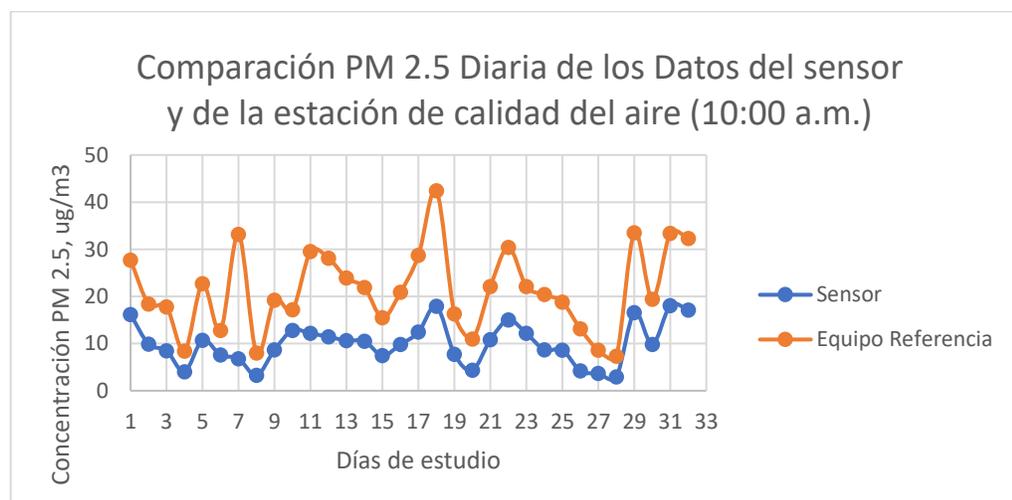
La **gráfica 2**, muestra un caso similar a la gráfica 1 pero en este caso se tiene en cuenta el contaminante PM10. Se observa que el comportamiento de ambos equipos nuevamente sigue una misma tendencia, cuando la concentración aumenta o disminuye en la estación en el sensor de bajo costo también lo hace, y en general el sensor presenta un comportamiento muy parecido al obtenido del PM2.5, donde se mantuvo en todas las ocasiones por debajo de las mediciones de la estación Fontibón, y mayor cercanía entre datos, para días cuyas concentraciones son bajas.

### 8.2.2. Análisis diario.

Para observar más a fondo la tendencia de los equipos para ambos contaminantes, se desarrolló un análisis por hora, día a día, es decir se comparó los 32 datos de cada hora para observar su comportamiento.

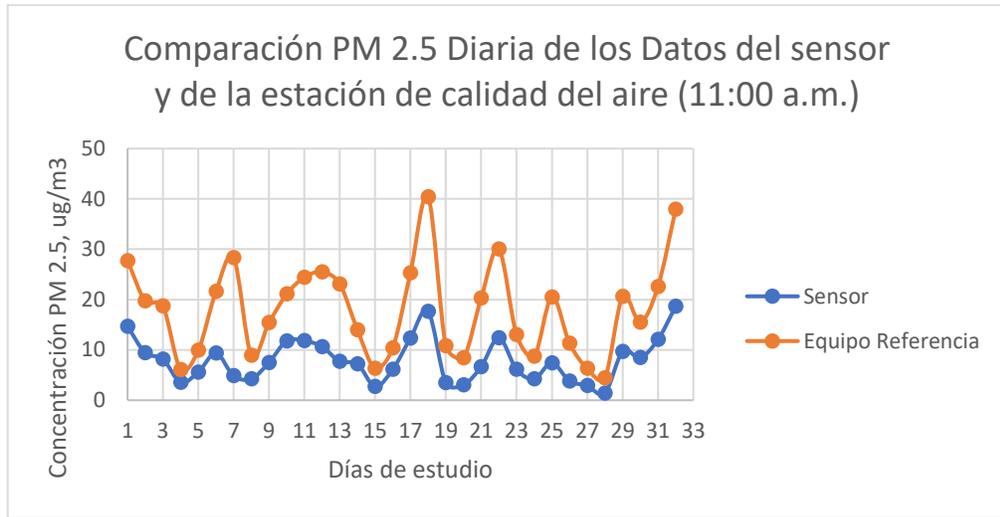
#### 8.2.2.1. Análisis para PM2.5

*Gráfica 3 Comparación PM2.5 diaria 10:00 a.m.*



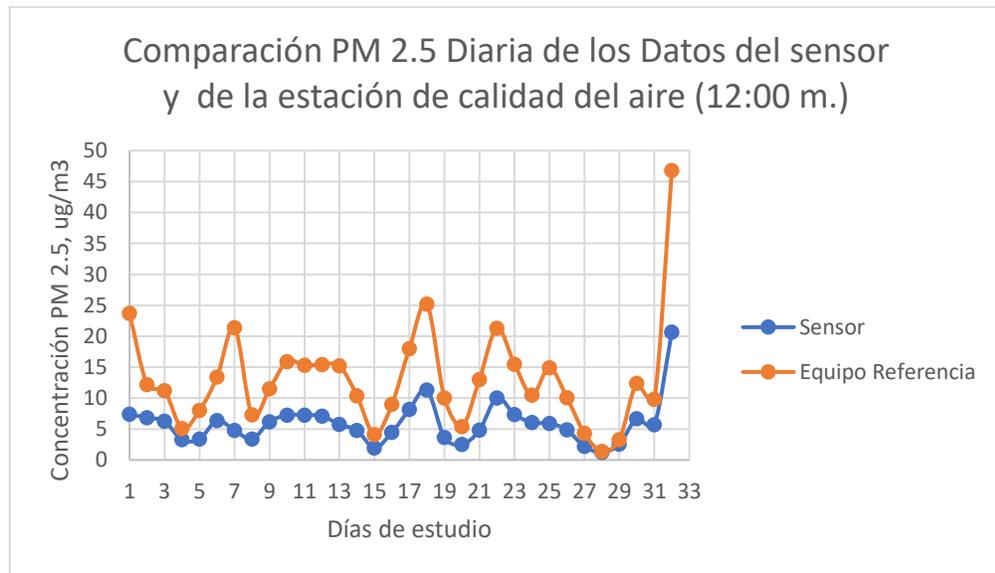
**Fuente:** Autor.

Gráfica 4 Comparación PM2.5 diaria 11:00 a.m.



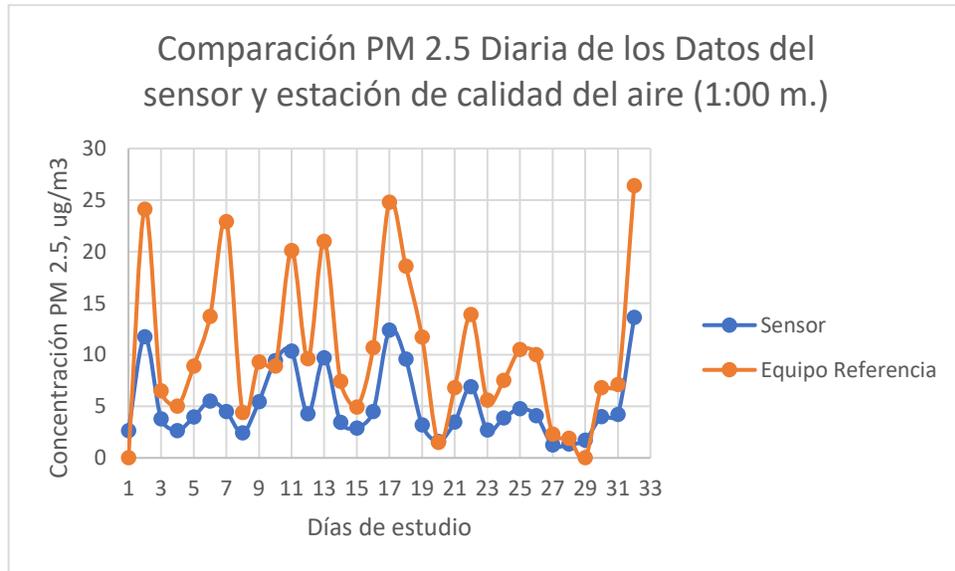
Fuente: Autor.

Gráfica 5 Comparación PM2.5 diaria 12:00 m.



Fuente: Autor.

Gráfica 6 Comparación PM2.5 diaria 1:00 p.m.

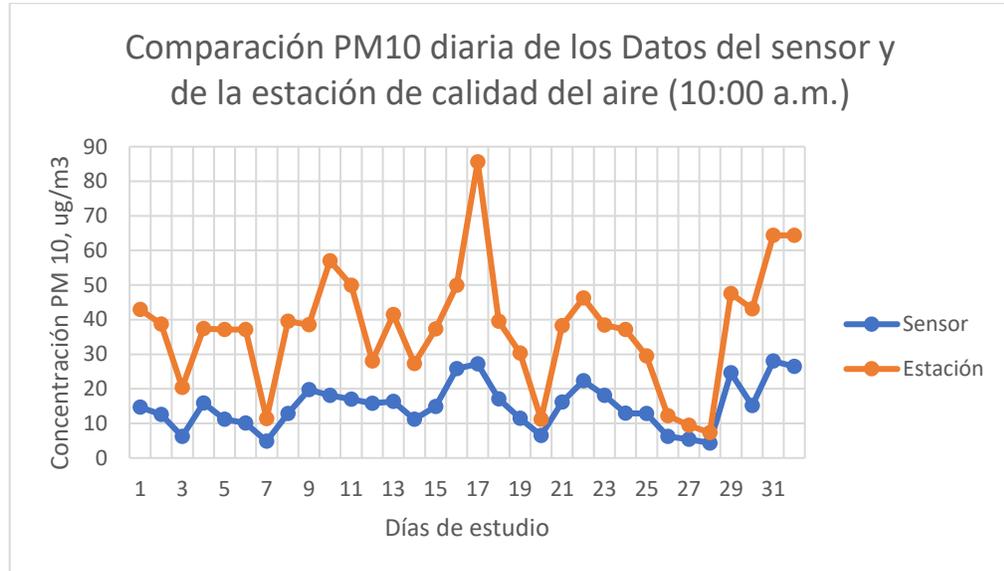


**Fuente:** Autor.

En las **gráficas 3, 4, 5 y 6** se muestran los resultados para PM2.5 de las 10:00 a.m., 11:00 a.m., 12:00 m. y 1:00 p.m. respectivamente, cada una de ellas muestra una tendencia similar a la que se observó en los análisis diarios, el sensor de bajo costo siempre está por debajo de las concentraciones de la estación y son más cercanos para datos bajos en los contaminantes, el día 29 muestra una excepción a la 1:00 p.m. ya que el dato de la Secretaría Distrital de Ambiente para este periodo fue de 0, esto se observa en la **gráfica 6**.

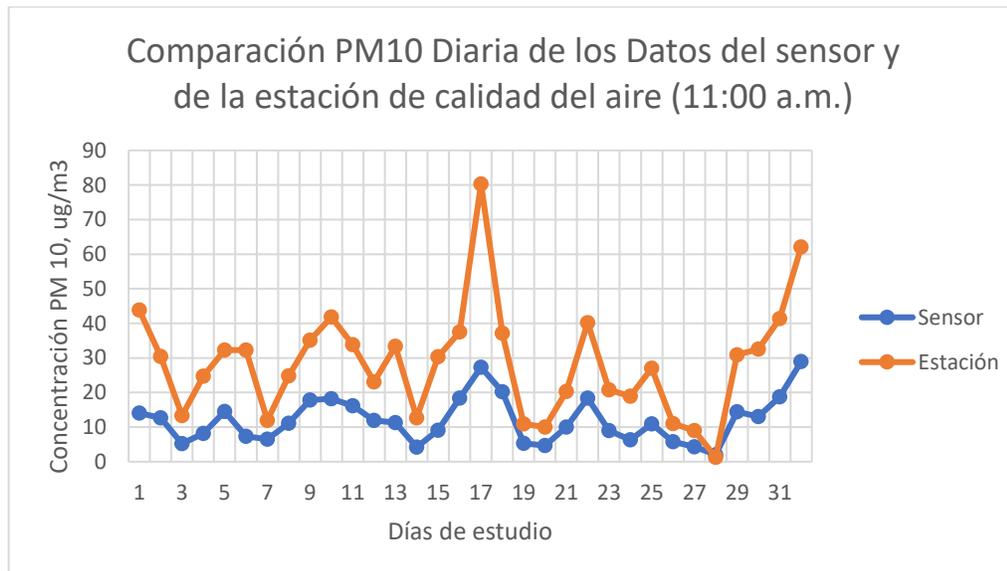
### 8.2.2.2. Análisis para PM10

Gráfica 7. Comparación PM10 diaria 10:00 a.m.



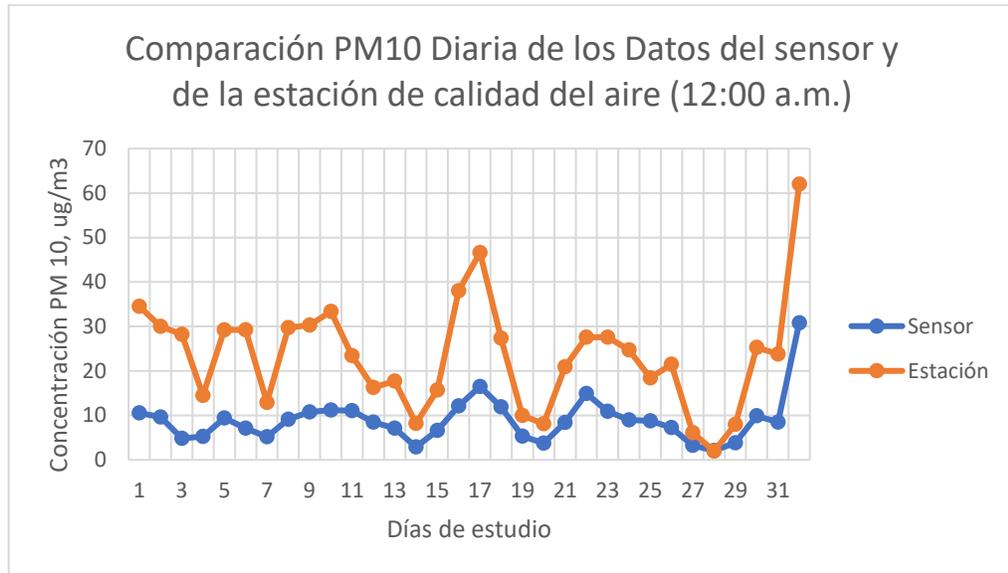
Fuente: Autor.

Gráfica 8. Comparación PM10 diaria 11:00 a.m.



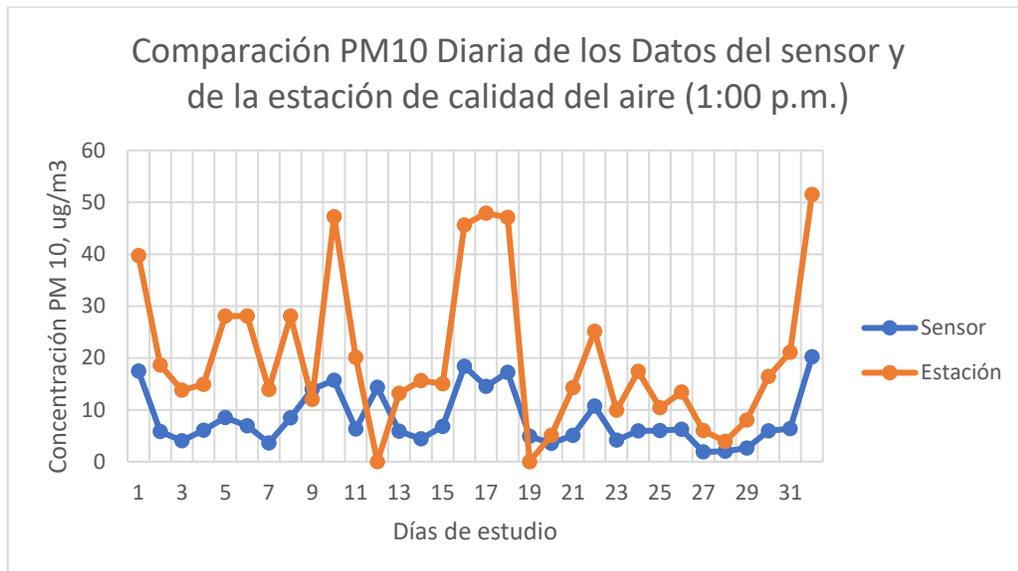
Fuente: Autor.

Gráfica 9. Comparación PM10 diaria 12:00 m.



Fuente: Autor.

Gráfica 10. Comparación PM10 diaria 1:00 p.m.



Fuente: Autor.

En las **gráficas 7, 8, 9 y 10** se muestra el mismo análisis hora a hora, pero para PM10 mostrando exactamente la misma tendencia del sensor frente al comportamiento del equipo de referencia. Se muestran excepciones en la **gráfica 10**, en donde la estación está por debajo a los datos del sensor, esto se debe a que para esta hora en los días 12 y 19 la Secretaría de Ambiente no reportó datos. Para el día 28 las concentraciones si fueron reportadas, pero en esta ocasión si fueron menores a las medidas por el sensor, esto se debe posiblemente a obstrucciones o modificaciones en las condiciones del ambiente a la altura del sensor, este comportamiento se evidencia en las **gráficas 8 y 9**.

### **8.3. Correlación entre las concentraciones de los contaminantes obtenidas del equipo de bajo costo y la estación de monitoreo de calidad del aire Fontibón**

Para determinar la asociación entre estas dos variables cuantitativas (Concentración obtenida por el sensor de bajo costo y obtenida por el equipo de referencia) se realizó un estudio basado en el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, el cual mide la relación con una línea recta. La validez de la prueba de hipótesis sobre la correlación que exista entre las variables requiere que al menos una de las variables tenga una distribución normal.

Para la evaluación del supuesto de normalidad se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk, aplicable para menos de 50 datos y en la cual se plantea en la hipótesis nula que la muestra proviene de una distribución normal y con un nivel de significancia de 0.05 la hipótesis alterna establece que la distribución no es normal.

Teniendo en cuenta lo anterior y utilizando la herramienta de análisis estadístico en Excel se calcularon los estadísticos p para cada conjunto de datos (concentración PM 2.5 sensor, Concentración PM 2.5 Estación, Concentración PM 10 sensor, Concentración PM 10 Estación, Humedad Relativa y Temperatura) tanto diarios como mensuales, en la totalidad de los casos los p-valores fueron mayores al nivel de significancia escogido (  $\alpha = 0.05$ ) por lo tanto no hay evidencia para rechazar

la hipótesis nula y los datos presentan una distribución gaussiana. Lo anterior cumple con el supuesto para calcular los coeficientes de Pearson a cada conjunto de datos. En la **Tabla 3** se muestran los valores para los datos mensuales.

*Tabla 3 Prueba de Shapiro Wilk para las concentraciones PM 10, PM2.5, Humedad y Temperatura*

	PM2,5		PM10		HUMEDAD	TEMPERATURA
	SENSOR	ESTACIÓN	SENSOR	ESTACIÓN	ESTACION	ESTACION
p- valor	0.15884059	0.17313939	0.15777726	0.15466846	0.0777773	0.517939575

**Fuente:** Autor.

Así mismo se realizó la estadística descriptiva para las variables estudiadas en el análisis mensual, lo cual se muestra en la **Tabla 4** y se observa que el promedio de las mediciones para las concentraciones tanto de PM 2.5 como de PM 10 no superaron la normatividad actual Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es decir estuvieron por debajo de  $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM 2.5 y PM 10 respectivamente.

*Tabla 4 Estadísticos descriptivos para Temperatura °C, Humedad Relativa %, Concentración PM 2.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y Concentración PM 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .*

	PM2,5		PM10		HUMEDAD RELATIVA	TEMPERATURA
	SENSOR	ESTACIÓN	SENSOR	ESTACIÓN	ESTACION	ESTACION
MEDIA	7.304947917	15.8859375	11.0840299	27.7760417	45.6953125	18.85234375
ERROR ESTÁNDAR	0.614019775	1.32372929	0.94311024	2.39167123	1.387486122	0.191181464
MEDIANA	6.8125	14.2	10.2789583	25.5125	45	18.925
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3.473420374	7.48814369	5.33503718	13.5293355	7.848806765	1.081485675
VARIANZA	12.0646491	56.0722959	28.4626218	183.04292	61.60376764	1.169611265
MAXIMO	17.51666667	35.85	26.5920833	65.1	61.5	20.7
MINIMO	1.7325	3.75	2.62	3.625	34	16.2

**Fuente:** Autor.

Para determinar la asociación entre las concentraciones de PM 2.5 y PM 10 medidas con el sensor y la Estación de calidad del aire, se calcularon los coeficientes de Pearson tanto para los datos diarios como mensuales y se observa salvo muy pocas excepciones que los valores están por encima de 0.798 para PM 2.5 indicando que existe una correlación positiva alta como mínimo entre las dos variables antes mencionadas y en todos los casos las concentraciones medidas por el sensor y la estación de referencia son directamente proporcionales. Y coeficientes de Pearson por encima de 0.52 para PM 10 lo que indica una correlación positiva moderada como mínimo para este caso. Para los datos mensuales de las dos concentraciones presentan correlaciones positivas muy altas, lo que indica la concordancia de los datos de las dos mediciones. Lo anterior se muestra en las **Tablas 5, 6 y 7.**

*Tabla 5 Coeficiente de Pearson para las concentraciones diarias de PM 2.5*

<b>Días de muestreo</b>	<b>Coeficiente de Pearson</b>	<b>Días de muestreo</b>	<b>Coeficiente de Pearson</b>
1	0.986864722	17	0.92927903
2	0.979045772	18	0.99634664
3	0.982331013	19	0.94587124
4	0.884544802	20	0.97337159
5	0.984907591	21	0.8850073
6	0.814085701	22	0.95730812
7	0.860754768	23	0.9908492
8	0.927556877	24	0.96847057
9	0.999896079	25	0.88931834
10	0.452433455	26	-0.31662709
11	0.929300562	27	0.99619049
12	0.996690997	28	0.90864293
13	0.797840585	29	0.99673124
14	0.994913209	30	0.99681604
15	0.990842706	31	0.99963429
16	0.958137974	32	0.96831227

**Fuente:** Autor.

*Tabla 6 Coeficiente de Pearson para las concentraciones diarias de PM 10*

<b>Días de muestreo</b>	<b>Coeficiente de Pearson</b>	<b>Días de muestreo</b>	<b>Coeficiente de Pearson</b>
1	0.55821498	17	0.98366637
2	0.89729857	18	0.99885201
3	0.18315302	19	0.84462308
4	0.97667148	20	0.9755017
5	0.50660006	21	0.96327618
6	0.94275655	22	0.98834548
7	-0.65342041	23	0.99623134
8	0.63167052	24	0.98928067
9	0.52098227	25	0.98510865
10	0.75588879	26	0.91215007
11	0.87049823	27	0.90594788
12	0.9919071	28	0.99732418
13	0.98072646	29	0.98172777
14	0.97706099	30	0.99416697
15	0.92046362	31	0.83733379
16	0.81864524	32	0.96831227

**Fuente:** Autor.

*Tabla 7 Coeficientes de Pearson para los datos mensuales de PM 10 y PM2.5*

<b>Coeficiente de Pearson</b>	
<b>PM 2.5</b>	<b>PM 10</b>
0.90444094	0.92836784

**Fuente:** Autor.

Los anteriores resultados muestran que los datos de calidad del aire medidos por el sensor en evaluación, aunque se encuentran por debajo de las concentraciones medidas en la estación de referencia, si guardan una correlación alta y son útiles para establecer las tendencias en las variaciones de las concentraciones de material particulado.

#### **8.4. Influencia de variables meteorológicas como la humedad y la temperatura en la medición de la concentración de PM 2.5 en la zona de estudio.**

##### 8.4.1. Ecuaciones de calibración.

Ya con todos los datos y con el propósito de hallar una relación entre las concentraciones de los contaminantes y variables como la humedad relativa y la temperatura, se realizaron dos ecuaciones de calibración para el sensor, una para PM2.5 y una para PM10, tomando como variable dependiente para cada una el promedio diario de las concentraciones de cada contaminante obtenidos de la estación del distrito, y como variable independiente los promedios diarios del sensor.

Para ello se tabularon las concentraciones de los contaminantes (cada una por aparte) tanto del sensor como de la estación, junto con los datos de humedad relativa y temperatura que arroja la estación. Después por medio de un complemento estadístico de Excel se realizó una regresión lineal tomando los primeros 16 datos y se fijó como los valores de X los promedios de las concentraciones obtenidas de la estación, y para los valores de Y las concentraciones del sensor, la humedad relativa y la temperatura, estas últimas son promedios mensuales de los datos que arroja hora a hora en los intervalos escogidos. Y se tomaron como datos de validación los últimos 16 datos de las variables.

##### 8.4.1.2. Ecuación para PM2.5:

Para realizar la regresión necesaria para calcular la ecuación se tomaron los datos de PM2.5, la humedad relativa y la temperatura de la **Tabla 8**

Tabla 8 Coeficientes ecuación PM2.5

Variables	Coeficientes
Intercepción en y	-26,0026052
PM2.5 del sensor	1,76394438
Humedad relativa	0,25871302
Temperatura	0,93838994

**Fuente:** Autor.

Teniendo en cuenta la información de la **tabla 8**, la ecuación de calibración del sensor para PM2.5 queda así:

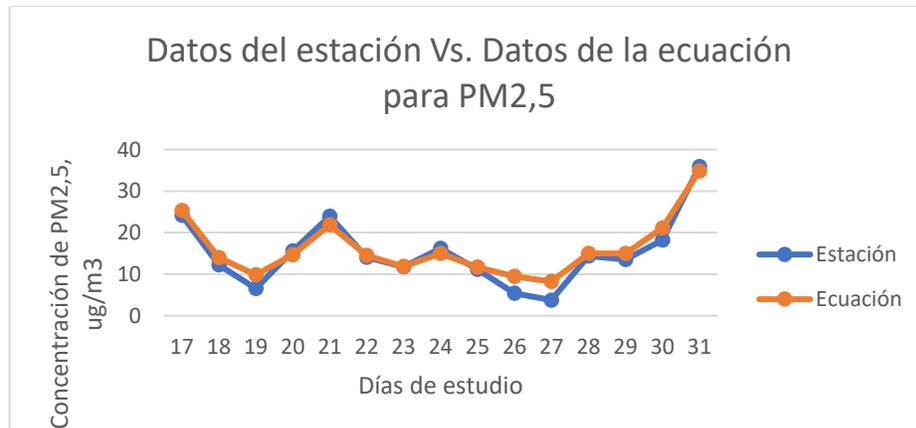
*Ecuación 3 Ecuación de calibración del sensor Temtop M2000C para PM2.5*

$$Y=1.7639PM2,5(s)+0,2587HR+0.9384t-26.0026$$

**Fuente:** Autor

A continuación, se muestra la comparación entre los datos obtenidos de la ecuación frente al sensor de bajo costo y a la Estación para de la Red de Monitoreo Distrital con los datos de validación:

*Gráfica 11 Datos del sensor Temtop M2000C Vs, Datos de la ecuación de calibración para PM2.5*



**Fuente:** Autor.

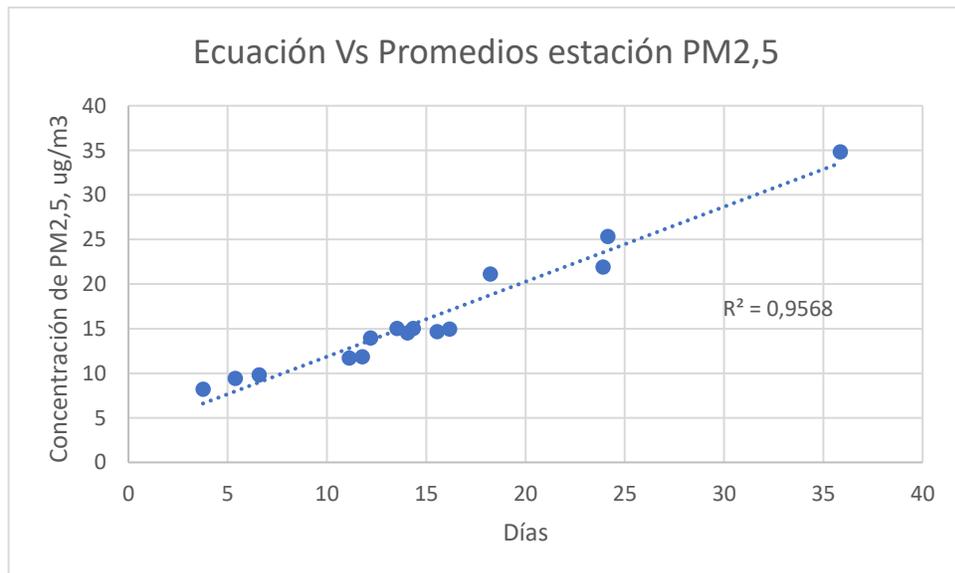
En la **gráfica 11**, se ve que el comportamiento de los datos calibrados presenta un incremento para todos los días, ya que el fin de la calibración es acercar los datos arrojados por el sensor de bajo costo a los datos obtenidos de la RMCAB. También se evidencia que los datos calibrados presentan la misma tendencia que los datos originales del equipo de bajo costo.

*Gráfica 12 Datos de la Estación Fontibón Vs. Datos de la ecuación de calibración para PM10*

**Fuente.** Autor.

En la **gráfica 12**, Se refleja el acercamiento de la calibración, donde los datos calibrados muestran la misma tendencia que los datos de la estación, exceptuando el día 6, esto posiblemente a la gran variación que presenta la estación frente al sensor de Temtop para ese día en particular.

*Gráfica 13 Resultados de la ecuación de calibración vs. los datos de PM2.5 del equipo de referencia, con su respectiva regresión lineal*



**Fuente:** Autor.

Se evidencia en la **gráfica 13** que el resultado de la calibración es positivo, ya que la relación entre los datos tiene un R2 de 0.9568 para PM2.5, mostrando una relación alta.

#### 8.4.1.3. Ecuación PM10:

El proceso para calcular esta ecuación es exactamente el mismo que para PM2.5, pero en este caso se hace el manejo de los datos para las concentraciones de PM10.

*Tabla 9 Coeficientes de la ecuación para PM10*

<i>Variables</i>	<i>Coeficientes</i>
Intercepción en y	56,7287936
PM10 del sensor	2,52087487
Humedad relativa (HR)	-0,35356024
Temperatura (t)	-2,06088962

**Fuente:** Autor.

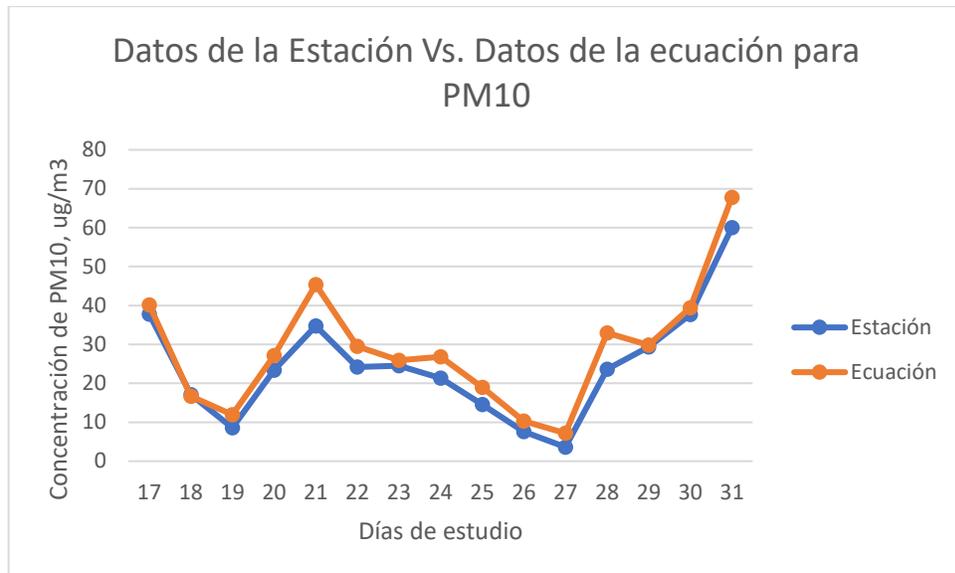
*Ecuación 4 Ecuación de calibración del sensor Temtop M2000C para PM10*

$$Y=2.5208PM10(s)-0.3535HR-2.0608t+56.7287$$

**Fuente:** Autor.

A continuación, en la **Gráfica 14** se muestra la comparación de los datos obtenidos de la calibración frente a los equipos estudiados.

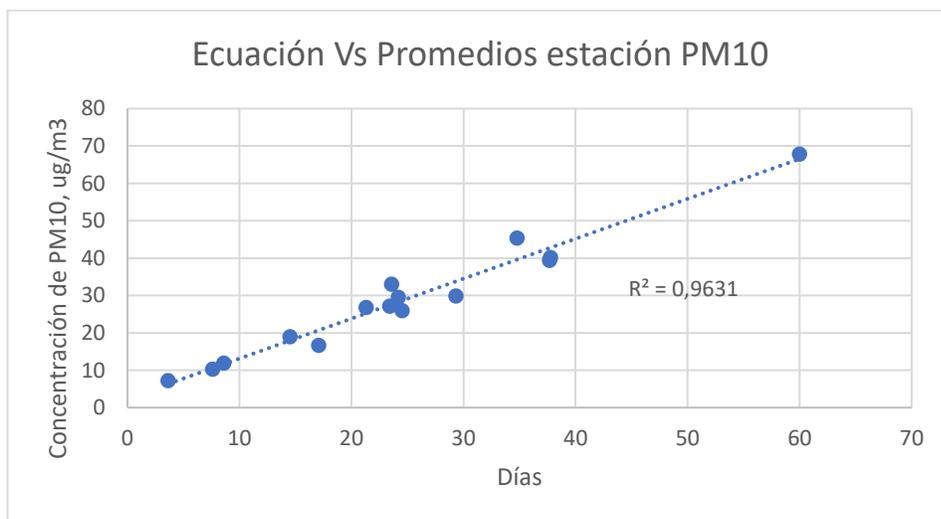
Gráfica 14 Datos de la estación Fontibón Vs. Datos de la Ecuación de calibración para PM10



Fuente: Autor.

Se evidencia que los datos de la calibración se acercan a los datos de la RMCAB tal como lo muestra la **gráfica 15**.

Gráfica 15 Resultados de la ecuación de calibración Vs. Los datos de PM10 del equipo de referencia, con su respectiva regresión lineal



Fuente: Autor.

Para PM10 también se evidencia una mejora en los datos gracias a la calibración. El valor de R2 es 0.9635 siendo aún mayor que la de PM2.5 tal como se muestra en la **gráfica15**.

#### **8.4.2. Índices de calidad del aire (ICA, IBOCA).**

Se evaluaron los índices de calidad del aire a nivel nacional y a nivel local (ICA e IBOCA respectivamente). Estos índices se calculan según lo reglamentado en la resolución 2254 del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para el ICA (Índice de Calidad de Aire), y por la resolución 2410 del 2015 de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá para el IBOCA (Índice Bogotano de Calidad de Aire).

Al calcular estos índices según el valor obtenido se deben confrontar con una tabla que estos documentos presentar, donde se le asigna un color y un nivel de gravedad, las tablas son las siguientes

Estos cálculos se hicieron para los promedios diarios y el promedio diario de las 4 horas de estudio de las concentraciones de ambos contaminantes, y para los resultados que arrojan las ecuaciones de calibración. Lo anterior con el fin de realizar una comparación entre los datos del distrito y los del sensor calibrados.

8.4.1.2. Calibración PM2.5 Vs. Datos promedio diario para PM2.5 de la Estación.

Tabla 10 Resultados de ICA e IBOCA, para PM2.5 en los promedios diarios

RESULTADOS DESDE LA ECUACIÓN				RESULTADOS CON PROMEDIOS DE TODO EL DÍA EN LA ESTACIÓN				DÍA
ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	
63,740		66,015		66,568		68,928		14-dic
54,513		56,511		75,900		78,541		15-dic
41,535		43,144		57,686		67,813		16-dic
50,079		51,944		59,881		62,041		17-dic
56,592		58,652		64,807		67,114		18-dic
49,754		51,609		63,259		65,519		19-dic
40,520		42,098		50,226		52,095		20-dic
53,272		55,233		66,159		68,508		21-dic
67,239		69,619		77,320		80,004		22-dic
71,088		73,584		82,255		85,086		23-dic
63,176		65,434		61,940		64,161		24-dic
65,842		68,181		63,777		66,054		25-dic
57,128		59,205		50,068		51,933		26-dic
47,417		47,417		44,115		44,115		27-dic
51,981		53,903		60,817		63,005		28-dic
74,401		76,996		68,754		71,180		29-dic
83,837		86,716		72,999		75,553		30-dic
76,211		78,861		80,701		83,486		31-dic
58,096		58,096		51,278		53,179		1-ene
44,472		46,168		35,851		35,851		2-ene
54,404		56,398		56,181		58,229		3-ene
69,148		71,585		70,013		72,477		4-ene
54,108		56,094		66,619		68,981		5-ene
48,618		50,439		52,361		54,295		6-ene
55,000		57,013		59,330		61,473		7-ene
48,716		48,716		37,483		37,483		8-ene
39,277		39,277		27,431		27,431		9-ene
34,234		34,234		22,622		22,622		10-ene
55,104		57,120		41,701		41,701		11-ene
55,103		57,119		59,090		61,226		12-ene
67,546		69,936		73,501		76,070		13-ene
95,560		98,791		85,572		88,504		14-ene

Fuente: Autor.

En la **tabla 10** se muestra que a excepción de los días 1, 2 y 12 de enero donde los datos varían de categoría, por poca diferencia, se confirma que la calibración para PM2.5 es aceptable.

8.4.2.2. Calibración PM2.5 Vs. Promedio del rango de horas de estudio diario para PM2.5 de la Estación.

Tabla 11. Resultados de ICA e IBOCA, para PM2.5 en durante el rango de 4 horas.

RESULTADOS DESDE LA ECUACIÓN				RESULTADOS CON PROMEDIOS DEL RANGO DE 9:00AM-1:00PM				DÍA
ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	
63,740		66,015		62,433		64,670		14-dic
54,513		56,511		52,123		54,049		15-dic
34,851		34,851		25,625		25,625		16-dic
52,288		51,944		49,724		51,578		17-dic
65,578		58,652		55,849		57,887		18-dic
51,623		51,609		78,460		81,178		19-dic
32,779		42,098		29,792		29,792		20-dic
58,803		55,233		52,735		54,680		21-dic
87,307		69,619		56,666		58,729		22-dic
95,162		73,584		70,039		72,503		23-dic
79,015		65,434		64,577		66,878		24-dic
84,457		68,181		66,925		69,296		25-dic
66,673		59,205		51,868		53,786		26-dic
47,417		47,417		32,083		32,083		27-dic
56,169		53,903		50,490		52,367		28-dic
101,923		76,996		73,867		76,446		29-dic
121,181		86,716		89,077		92,114		30-dic
105,618		78,861		73,765		76,341		31-dic
58,096		54,876		49,367		51,210		1-ene
40,844		46,168		27,396		27,396		2-ene
61,113		56,398		56,206		58,255		3-ene
91,202		71,585		73,254		75,815		4-ene
60,510		56,094		53,144		55,101		5-ene
49,306		50,439		49,063		49,063		6-ene
62,331		57,013		57,482		59,570		7-ene
48,716		50,142		46,354		46,354		8-ene
39,277		45,378		22,396		22,396		9-ene
34,234		42,832		15,625		15,625		10-ene
62,543		57,120		53,756		55,732		11-ene
62,541		57,119		52,072		53,997		12-ene
87,934		69,936		61,668		63,881		13-ene
145,105		98,791		97,652		100,946		14-ene

Fuente: Autor.

En la **Tabla 11** también presenta variaciones en algunos días, pero en general los resultados son aceptables.

8.4.2.3. Calibración PM10 Vs. Datos promedio diario para PM10 de la Estación.

*Tabla 12 Resultados de ICA e IBOCA, para PM10 en los promedios diarios*

RESULTADOS DESDE LA ECUACIÓN				RESULTADOS CON PROMEDIOS DE TODO EL DÍA EN LA ESTACIÓN				DÍA
ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	
19,649		19,649		42,423		42,423		14-dic
24,434		24,434		46,204		46,204		15-dic
14,147		14,147		33,372		33,372		16-dic
21,480		21,480		33,792		33,792		17-dic
25,068		25,068		37,550		37,550		18-dic
18,991		18,991		32,597		32,597		19-dic
13,793		13,793		19,888		19,888		20-dic
25,475		25,475		34,715		34,715		21-dic
36,300		36,300		45,330		45,330		22-dic
35,719		35,719		49,549		49,549		23-dic
29,347		29,347		23,796		23,796		24-dic
28,405		28,405		21,842		21,842		25-dic
22,671		22,671		20,903		20,903		26-dic
12,728		12,728		17,558		17,558		27-dic
22,634		22,634		33,762		33,762		28-dic
41,279		41,279		34,591		34,591		29-dic
47,830		47,830		43,179		43,179		30-dic
36,513		36,513		33,669		33,669		31-dic
14,537		14,537		15,958		15,958		1-ene
11,223		11,223		10,633		10,633		2-ene
23,182		23,182		25,783		25,783		3-ene
37,725		37,725		36,334		36,334		4-ene
25,690		25,690		31,454		31,454		5-ene
20,730		20,730		27,485		27,485		6-ene
22,502		22,502		28,341		28,341		7-ene
13,903		13,903		12,469		12,469		8-ene
8,403		8,403		8,241		8,241		9-ene
6,166		6,166		6,491		6,491		10-ene
27,174		27,174		17,589		17,589		11-ene
27,132		27,132		31,115		31,115		12-ene
35,869		35,869		42,330		42,330		13-ene
55,335		55,335		50,089		50,089		14-ene

Fuente: Autor.

A excepción del 15 de enero todos los días obtuvieron la misma clasificación como lo muestra la **tabla 12**.

8.4.2.4. Calibración PM10 Vs. Promedio del rango de horas de estudio diario para PM10 de la Estación.

*Tabla 13 Resultados de ICA e IBOCA, para PM10 en durante el rango de 4 horas.*

RESULTADOS DESDE LA ECUACIÓN				RESULTADOS CON PROMEDIOS DEL RANGO DE 9:00AM-1:00PM				DÍA
ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	ICA	COLOR	IBOCA	COLOR	
35,830		35,830		37,269		37,269		14-dic
25,456		25,456		27,245		27,245		15-dic
13,791		13,791		17,523		17,523		16-dic
23,993		23,993		21,181		21,181		17-dic
28,286		28,286		29,329		29,329		18-dic
20,401		20,401		29,329		29,329		19-dic
14,729		14,729		11,597		11,597		20-dic
27,105		27,105		28,264		28,264		21-dic
37,983		37,983		26,829		26,829		22-dic
36,756		36,756		41,528		41,528		23-dic
29,402		29,402		29,444		29,444		24-dic
28,640		28,640		20,802		20,802		25-dic
24,932		24,932		24,491		24,491		26-dic
14,502		14,502		14,769		14,769		27-dic
24,295		24,295		22,755		22,755		28-dic
44,335		44,335		39,583		39,583		29-dic
50,340		50,340		60,278		60,278		30-dic
37,189		37,189		34,977		34,977		31-dic
15,428		15,428		15,802		15,802		1-ene
11,031		11,031		7,963		7,963		2-ene
25,122		25,122		21,690		21,690		3-ene
42,010		42,010		32,199		32,199		4-ene
27,333		27,333		22,384		22,384		5-ene
24,027		24,027		22,708		22,708		6-ene
24,803		24,803		19,745		19,745		7-ene
17,529		17,529		13,449		13,449		8-ene
9,513		9,513		7,060		7,060		9-ene
6,649		6,649		3,356		3,356		10-ene
30,540		30,540		21,852		21,852		11-ene
27,643		27,643		27,153		27,153		12-ene
36,492		36,492		34,884		34,884		13-ene
57,335		57,335		53,475		53,475		14-ene

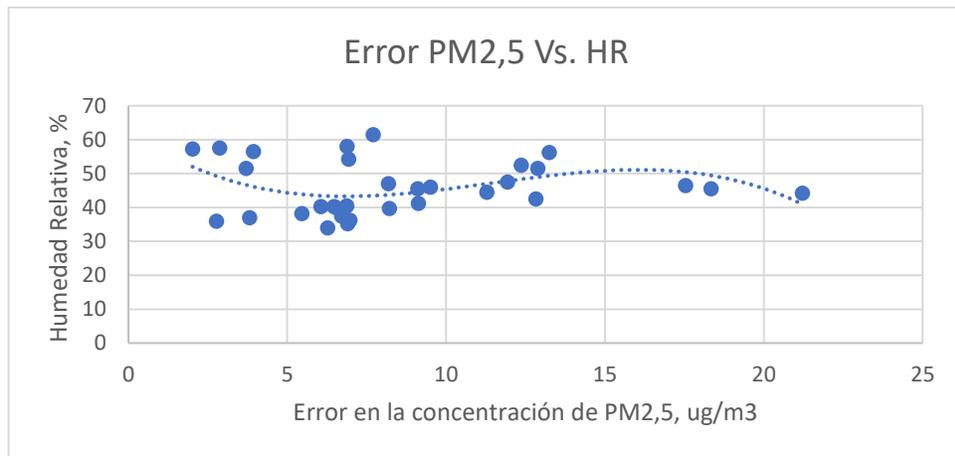
**Fuente;** Autor.

La **Tabla 13** muestra que en general los resultados para PM10 obtenidos de las ecuaciones son más adecuados en ambos casos expuestos.

Las concentraciones tanto para PM2.5 como para PM10 pueden estar influenciadas por la humedad relativa y la temperatura, lo anterior debido a que los datos del sensor de bajo costo al ser calibrados están en su mayoría en los mismos valores y la misma clasificación que los datos del equipo de referencia para los índices nacionales y locales.

Sin embargo, la relación de estas variables con la concentración de los contaminantes no implica que la humedad relativa y la temperatura, influyan en el error del sensor Temtop M2000C. Para demostrar esto se realizó una confrontación del error del sensor, el cual es la diferencia de las concentraciones obtenidas del equipo de referencia y las obtenidas por el equipo de bajo costo, con el promedio diario de ambas variables por aparte.

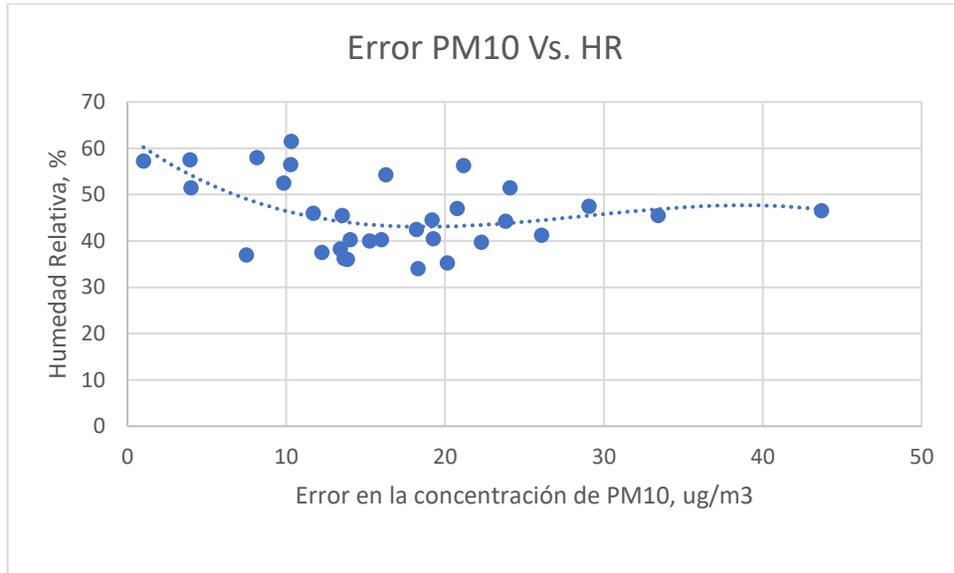
*Gráfica 16 Error PM2.5 Vs. Humedad Relativa*



**Fuente:** Autor.

De acuerdo con la **gráfica 16** no se observó variación del error con la humedad relativa.

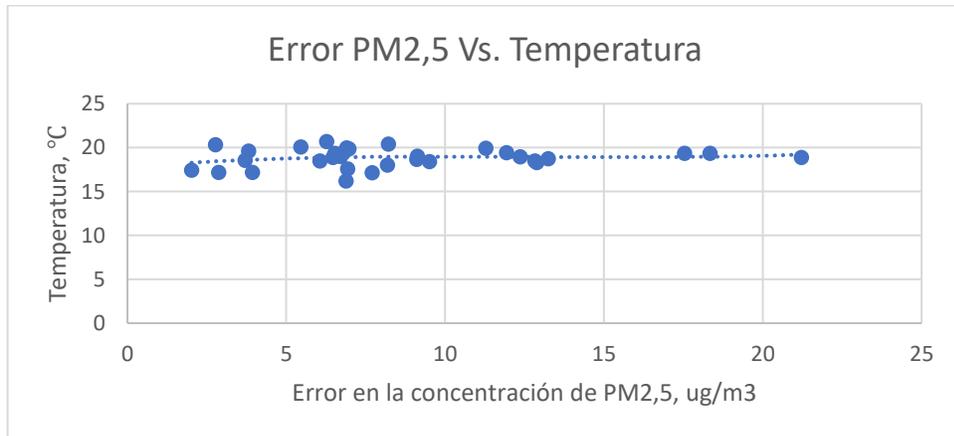
Gráfica 17 Error PM10 Vs. Humedad relativa



Fuente: Autor.

Aunque es mayor para PM10 comparada con la de PM 2.5 no existe una influencia apreciable de la humedad con el error de la concentración como se muestra en la **gráfica 17**.

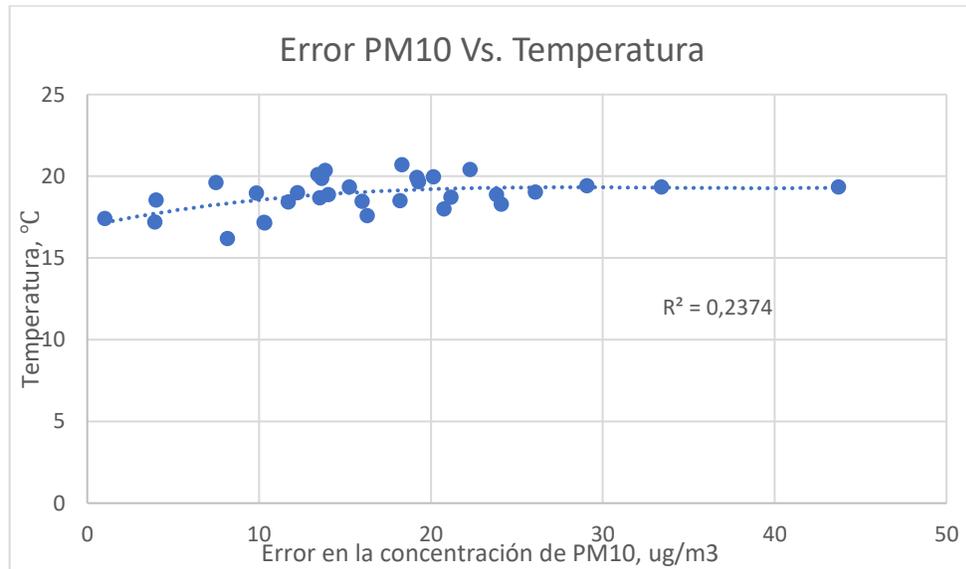
Gráfica 18 Error PM2.5 Vs. Temperatura



Fuente: Autor.

La relación en la **gráfica 18**, a comparación de la humedad relativa, para la temperatura es casi nula.

Gráfica 19 Error PM10 Vs. Temperatura

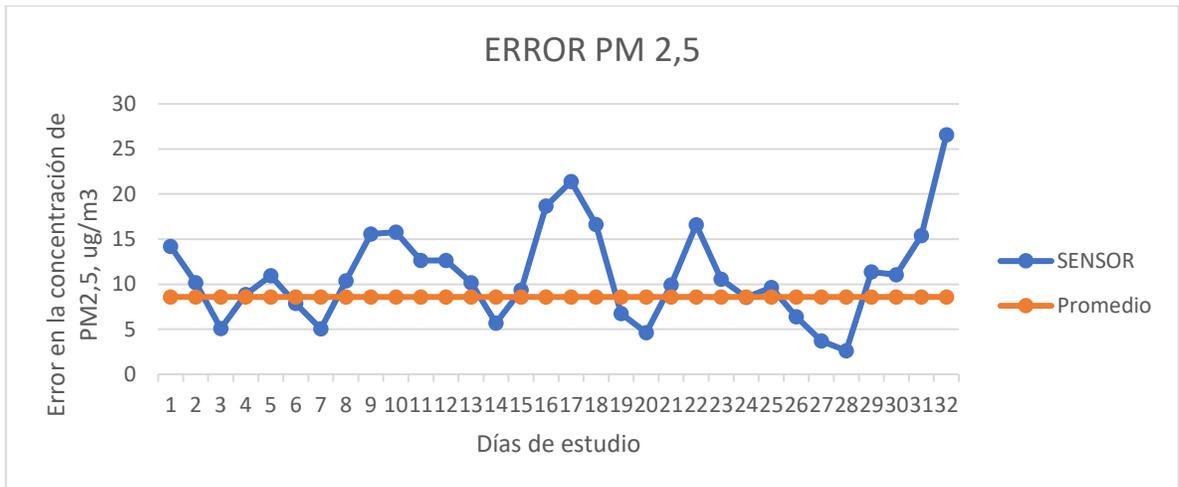


**Fuente:** Autor.

Se muestra en la **gráfica 19**, que se presenta el mismo comportamiento para PM 10 no hay variación del error con la temperatura.

En las **gráficas 16, 17, 18 y 19**, se muestra como el error del sensor de bajo costo no se ve influenciado por las variables humedad relativa y temperatura, ya que todas las correlaciones son muy bajas.

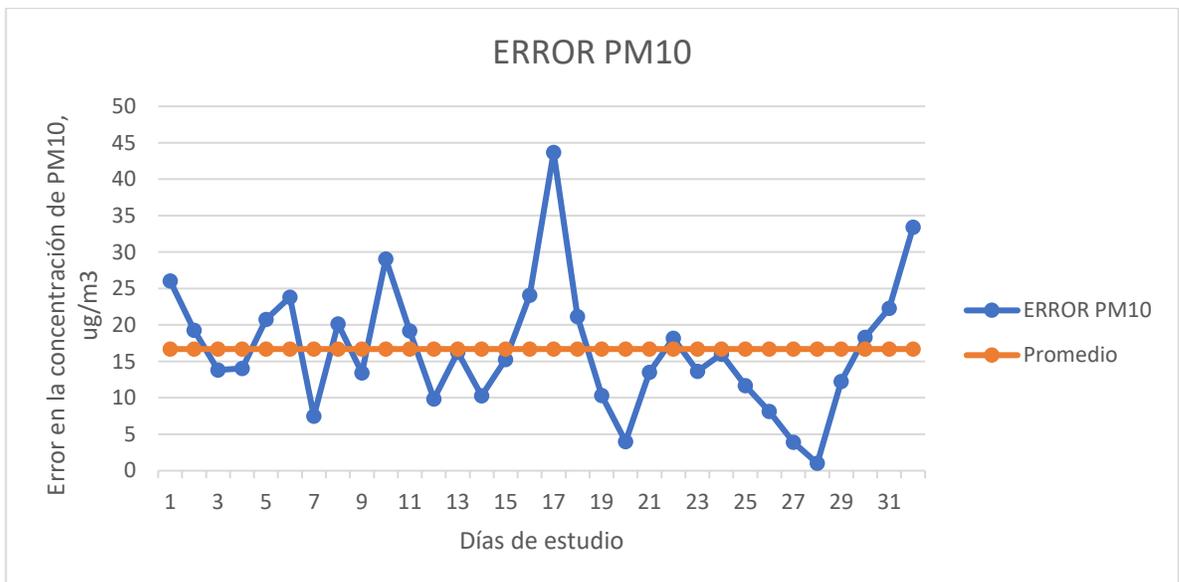
Gráfica 20 Dispersión en los errores de PM2.5



Fuente: Autor.

En la **gráfica 20** se evidencia la gran variación en los errores del sensor, lo que impide marcar una tendencia.

Gráfica 21 Dispersión en los errores de PM10

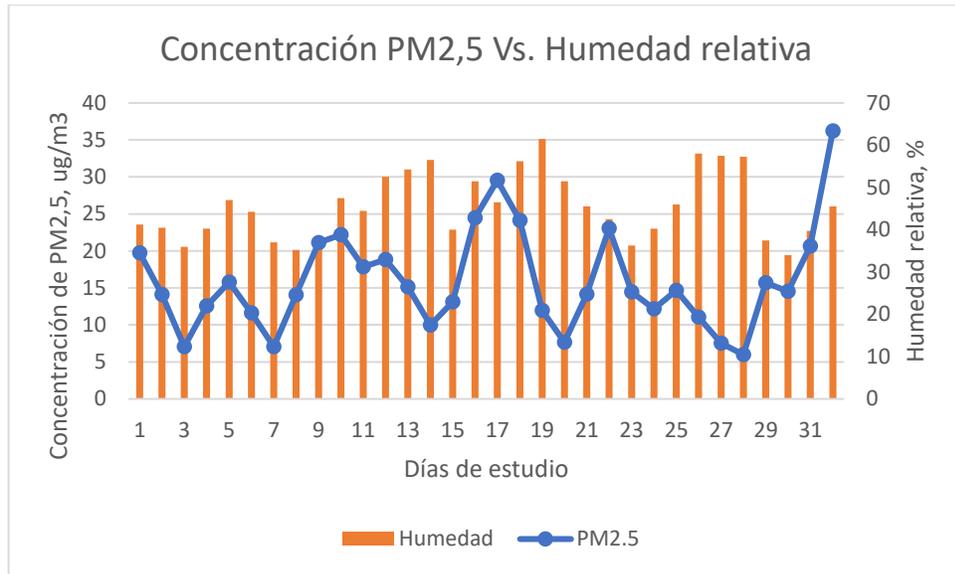


Fuente: Autor.

En la **gráfica 21** se evidencia que el contaminante PM10 presenta un comportamiento similar al PM2.5, no se muestra una tendencia en los errores.

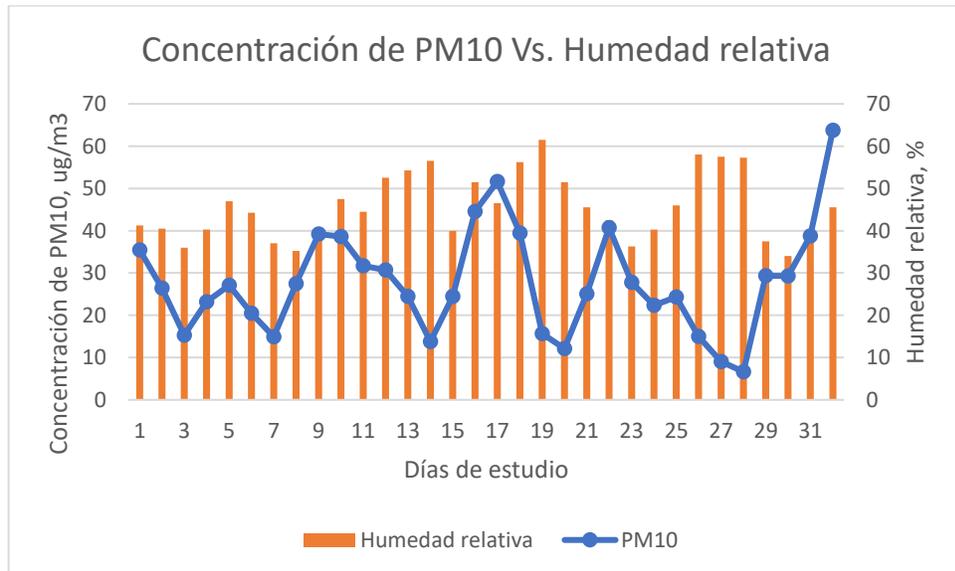
Después se decidió graficar directamente las concentraciones los contaminantes (PM2.5 y PM10) frente a las 2 variables (Humedad relativa y Temperatura) así.

*Gráfica 22 Concentración de PM2.5 de la Ecuación Vs. Humedad relativa*



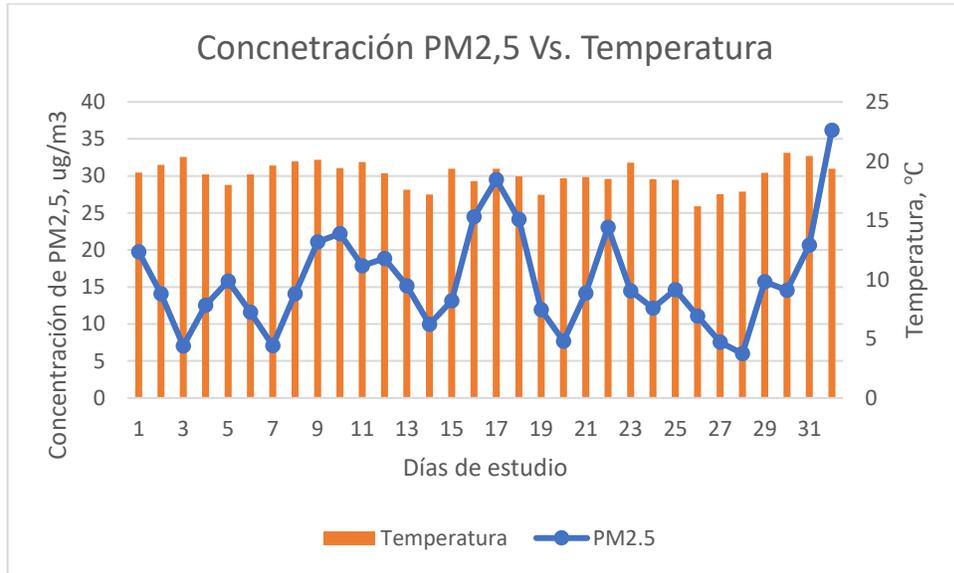
**Fuente:** Autor.

*Gráfica 23 Concentración de PM10 de la Ecuación Vs. Humedad relativa*



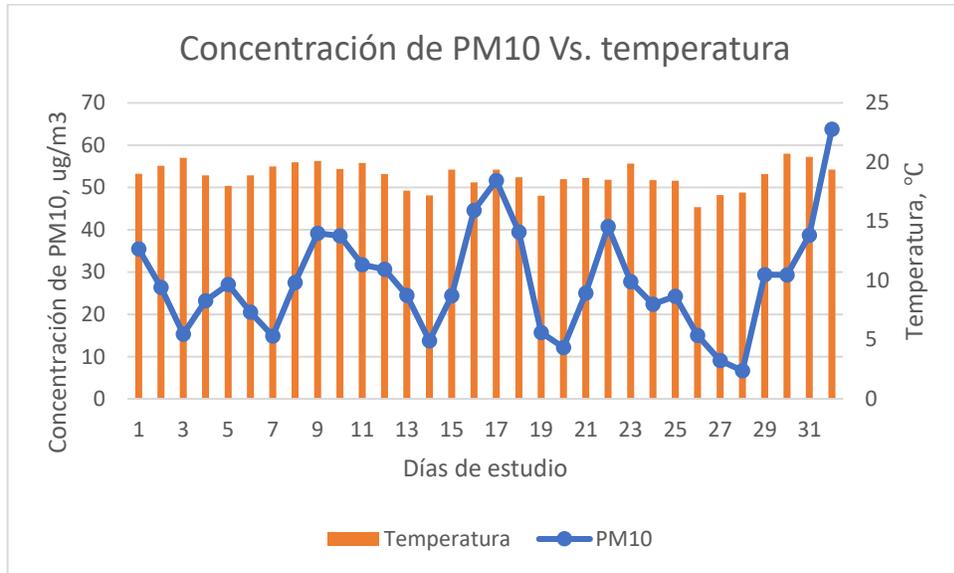
**Fuente:** Autor.

Gráfica 24 Concentración de PM2.5 de la Ecuación Vs. Temperatura



Fuente: Autor.

Gráfica 25 Concentración de PM10 de la Ecuación Vs. Temperatura



Fuente: Autor.

En las **Gráficas 22, 23, 24 y 25**, se evidencia una relación inversamente proporcional débil, ya que en el caso de la humedad relativa posee picos distintos a los presentados por los contaminantes, es decir, cuando la humedad relativa

mostraba sus valores más altos la concentración de los contaminantes presentan variaciones, desligándose así la humedad relativa. En cuanto a la temperatura también se ve una relación débil entre variables, pero en este caso es directamente proporcional. La temperatura presenta un comportamiento constante durante el periodo de estudio, mientras que los contaminantes muestran bastantes picos en sus valores, evidenciando esta débil relación.

Para comprobar esto se calcularon los coeficientes de Pearson entre las variables así:

*Tabla 14 Coeficiente de Pearson entre PM2.5 y las variables de estudio (Humedad y Temperatura)*

COEFICIENTE DE PEARSON PM2,5 Vs. Variables	
HUMEDAD	TEMPERATURA
-0,063734728	0,277255546

**Fuente:** Autor.

*Tabla 15 Coeficiente de Pearson entre PM10 y las variables de estudio (Humedad y Temperatura)*

COEFICIENTE DE PEARSON PM2,5 Vs. Variables	
HUMEDAD	TEMPERATURA
-0,24359061	0,429541168

**Fuente:** Autor.

En las **tablas 9 y 10**, muestra que, aunque para PM10 la relación inversa es mayor que para PM2.5, sigue siendo baja ya que sus valores están más cercanos a 0. Un caso similar sucede con la temperatura, en la concentración de PM2.5 hay una relación más débil entre las variables.

La relación inversa en la relación material particulado Vs. Humedad relativa, se debe a un aumento de la masa de las partículas por la absorción de humedad, haciendo que se precipiten haciendo básicamente una limpieza del aire, o sea, que a mayor porcentaje de humedad menor será la concentración del material particulado sea PM10 o PM2.5. Para el año 2019 en la ciudad de Bogotá, se llevó a cabo una investigación la cual buscaba estudiar esta misma relación entre humedad relativa y la concentración de los contaminantes primarios, allí se evidenciaron resultados similares al de este estudio, donde la relación de PM2.5 y PM10 mostraba valores negativos muy cercanos a cero, obteniendo una relación inversamente proporcional muy débil. (Sánchez & Bautista, 2019).

Autores han relacionado el efecto de la humedad relativa sobre las concentraciones de partículas especialmente en aerosoles. Las partículas finas son bastantes higroscópicas y la masa de agua en la fase de condensación se incrementa con la humedad relativa. (Rojano, Pérez & Freyle, 2012). También se evidencia un cambio en las propiedades ópticas de las partículas, esto afecta su refracción, la cual es uno de los factores más importantes para determinar la densidad del material particulado. (Roncanacio, 2019).

Una situación similar se presentó en un estudio realizado en la Universidad Libre sede Bosque Popular ubicada en Bogotá en el año 2019 por Cuitiva, Acosta & Ramírez, el cual, tenía como objeto buscar la relación entre el material particulado y variables como la temperatura y la precipitación. En el caso de la temperatura este estudio arrojó valores positivos muy cercanos a 0 en las correlaciones entre los contaminantes y la temperatura mostrando la baja relación entre sí.

Si embargo al realizar el estudio diario por horas se encontró una tendencia diferente para los 30 datos diarios obtenidos a las 13:00 p.m., mostrando una débil relación para Humedad y temperatura debido valores cercanos a cero, pero para ambas variables el sentido cambió, siendo directamente proporcional a la humedad, en inversamente para la temperatura.

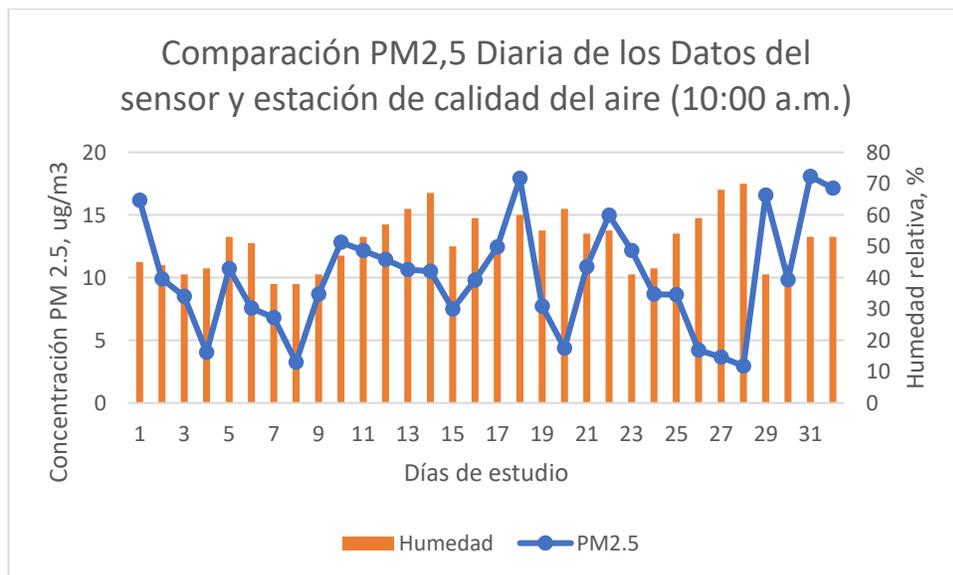
Lo anterior puede entenderse desde el estudio realizado por Bastidas en el 2019 en la ciudad de Quito, en donde buscaba predecir el comportamiento del PM2.5 en un área urbana por medio de inteligencia artificial. Bastidas en su estudio dice que en condiciones normales la Humedad tiene una fuerte relación indirectamente proporcional con la temperatura, es decir, si la Humedad disminuye la temperatura debe aumentar y viceversa (Bastidas, 2019). Sin embargo, en este estudio para las 13:00 p.m. esto no sucede, ya que la humedad relativa aumenta respecto a la hora anterior, mientras que la temperatura aumenta.

Para poner en evidencia lo sucedido se decidió graficar hora a hora las concentraciones de ambos contaminantes enfrentándolas con las variables estudiadas de la siguiente manera:

### ESTUDIO DE HUMEDAD RELATIVA

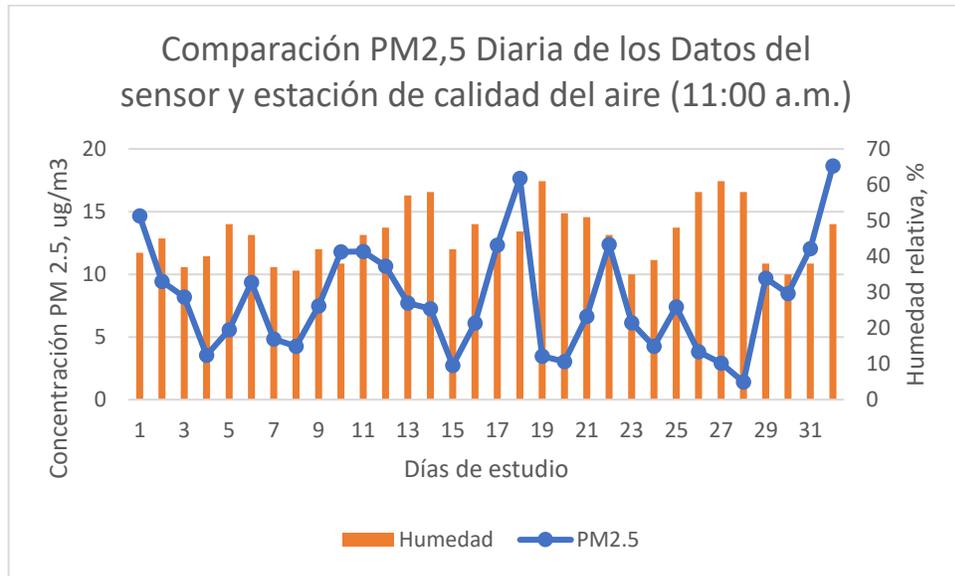
- PM2.5 Vs. Humedad relativa

*Gráfica 26 Comparación diaria entre PM2.5 y Humedad relativa para las 10:00 a.m.*



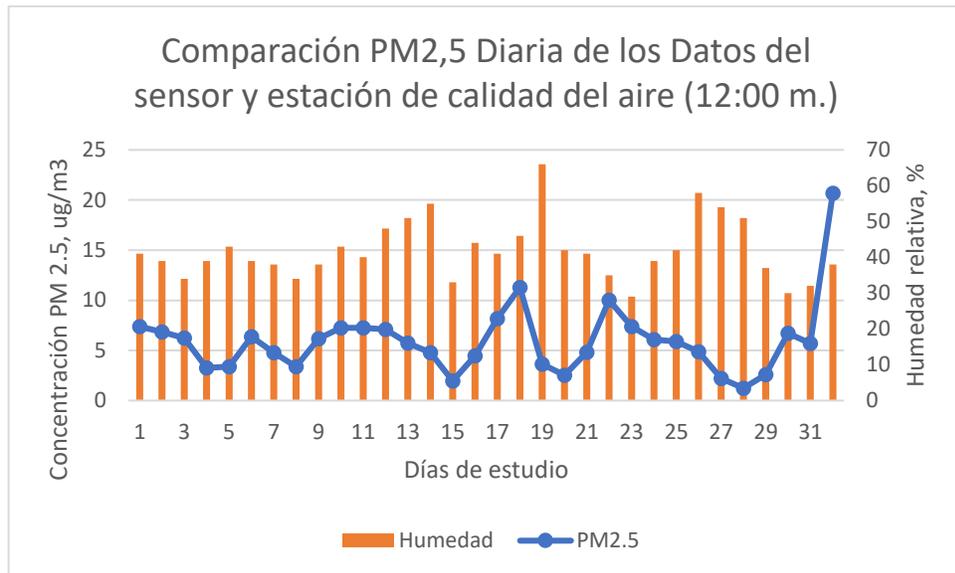
**Fuente:** Autor

**Gráfica 27 Comparación diaria entre PM2.5 y Humedad relativa para las 11:00 a.m.**



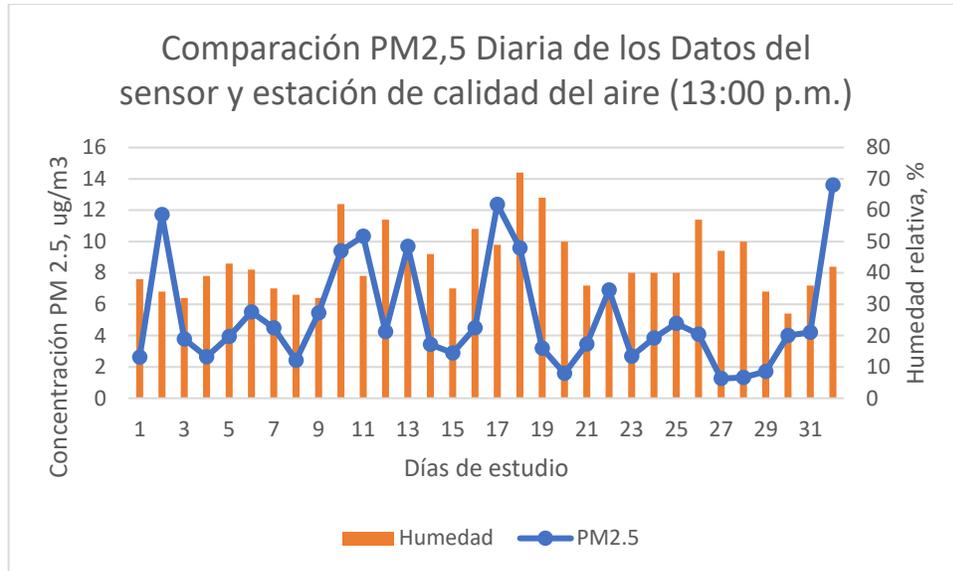
**Fuente:** Autor.

**Gráfica 28 Comparación diaria entre PM2.5 y Humedad relativa para las 12:00 m.**



**Fuente:** Autor.

Gráfica 29 Comparación diaria entre PM2.5 y Humedad relativa para las 13:00 p.m.

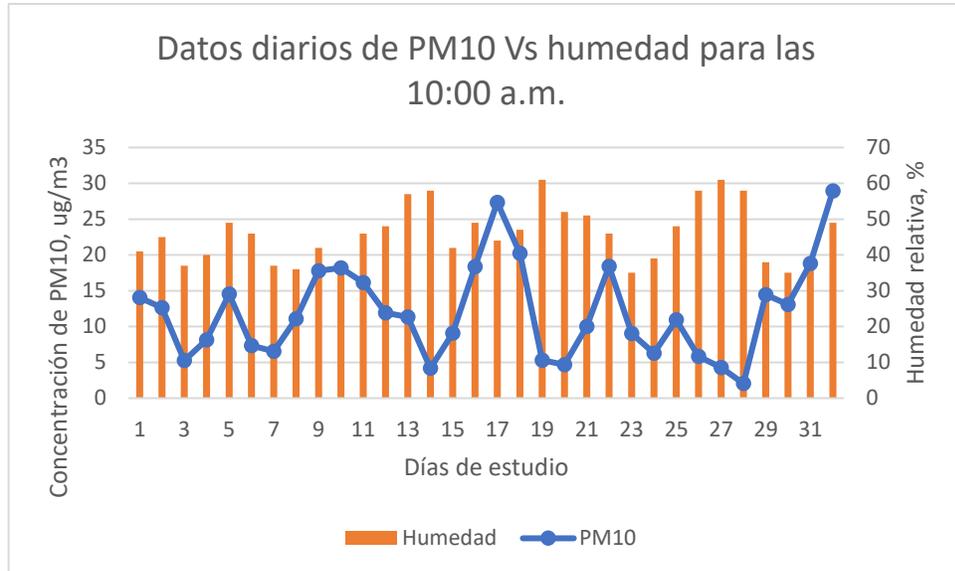


Fuente: Autor.

Las **gráficas 26, 27 y 28** muestran el comportamiento ya mencionado, donde la tendencia es una relación baja inversamente proporcional, esto se puede observar al obtener los coeficientes de Pearson, los cuales están entre (-0,2). Pero en la **gráfica 29** el comportamiento es ligeramente diferente, la débil relación es directamente proporcional, con un coeficiente de Pearson de 0.1631.

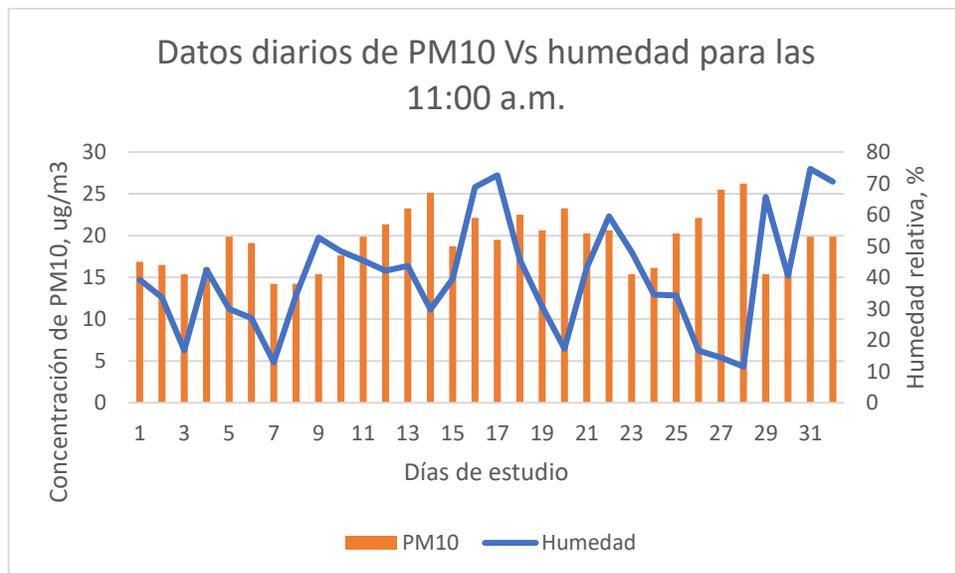
- PM10 Vs. Humedad relativa

Gráfica 30 Comparación diaria entre PM10 y Humedad relativa para las 10:00 a.m.



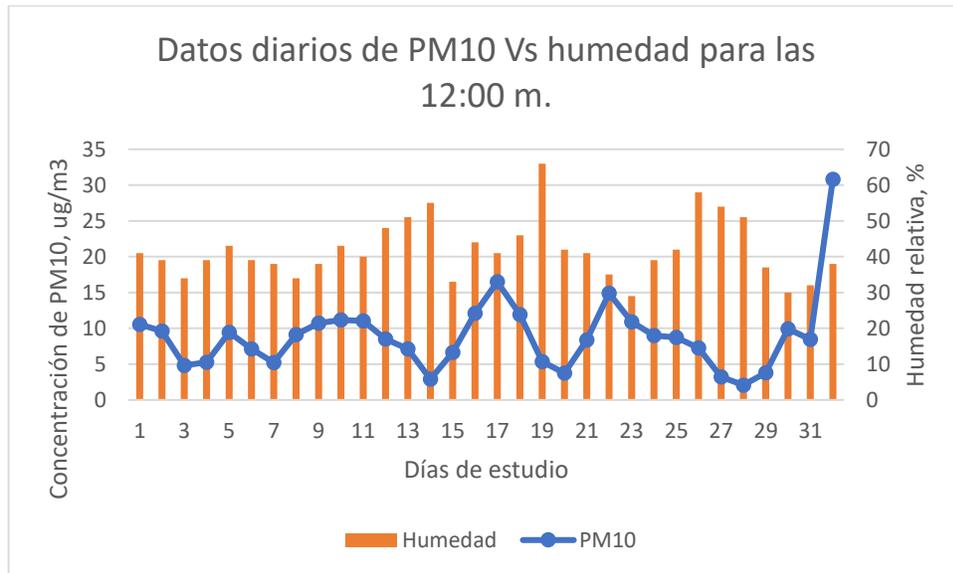
Fuente: Autor.

Gráfica 31 Comparación diaria entre PM10 y Humedad relativa para las 11:00 a.m.



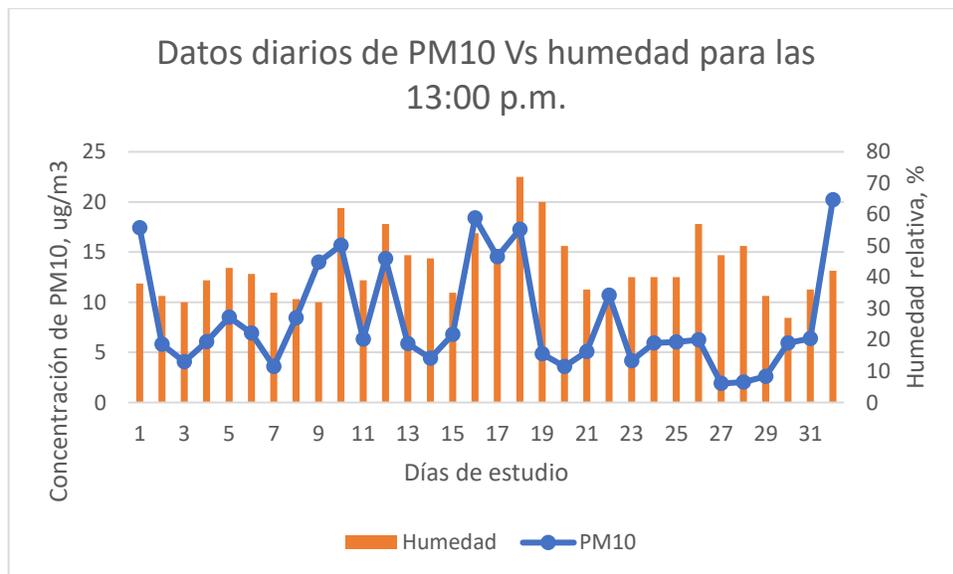
Fuente: Autor.

Gráfica 32 Comparación diaria entre PM10 y Humedad relativa para las 12:00 m.



Fuente: Autor.

Gráfica 33 Comparación diaria entre PM10 y Humedad relativa para las 13:00 p.m.



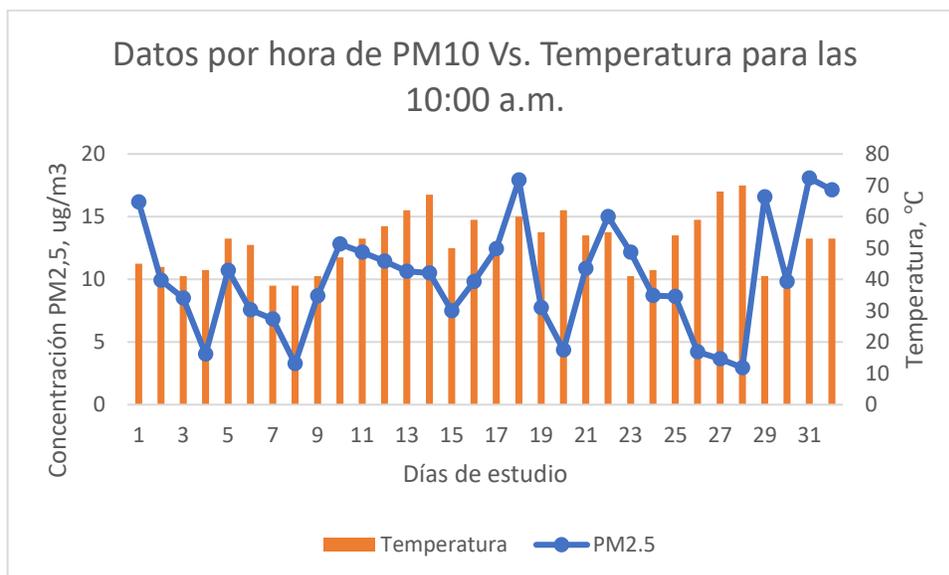
Fuente: Autor.

Las **gráficas 30, 31, 32 y 33**, muestran que para PM10 el comportamiento es el mismo, con una tendencia de relaciones débiles inversamente proporcionales, coeficientes de Pearson negativos cercanos a cero para las primeras horas, y un comportamiento diferente para la última, con un Pearson de 0.3221.

## ESTUDIO DE TEMPERATURA

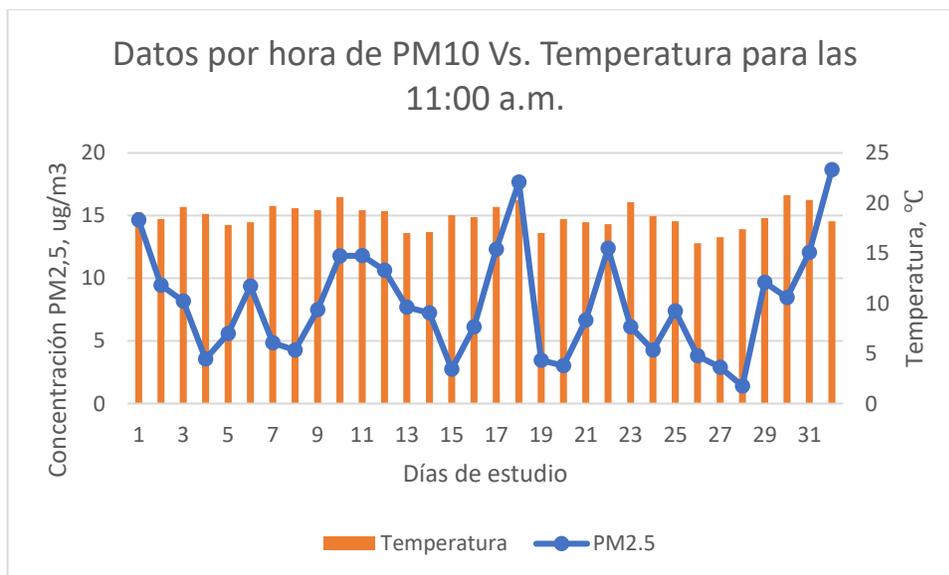
- PM2.5 Vs. Temperatura

Gráfica 34 Comparación diaria entre PM2.5 y Temperatura para las 10:00 a.m.



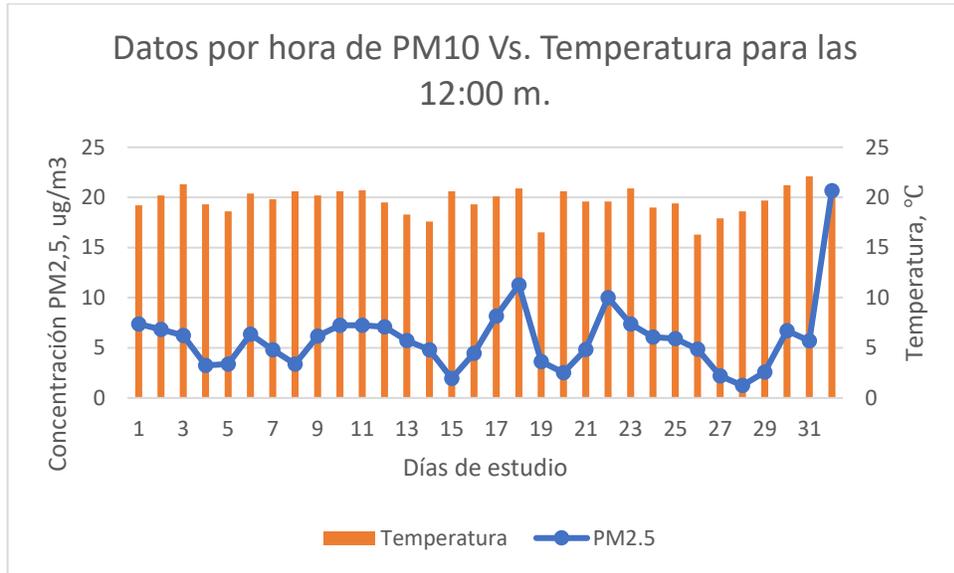
Fuente: Autor.

Gráfica 35 Comparación diaria entre PM2.5 y Temperatura para las 11:00 a.m.



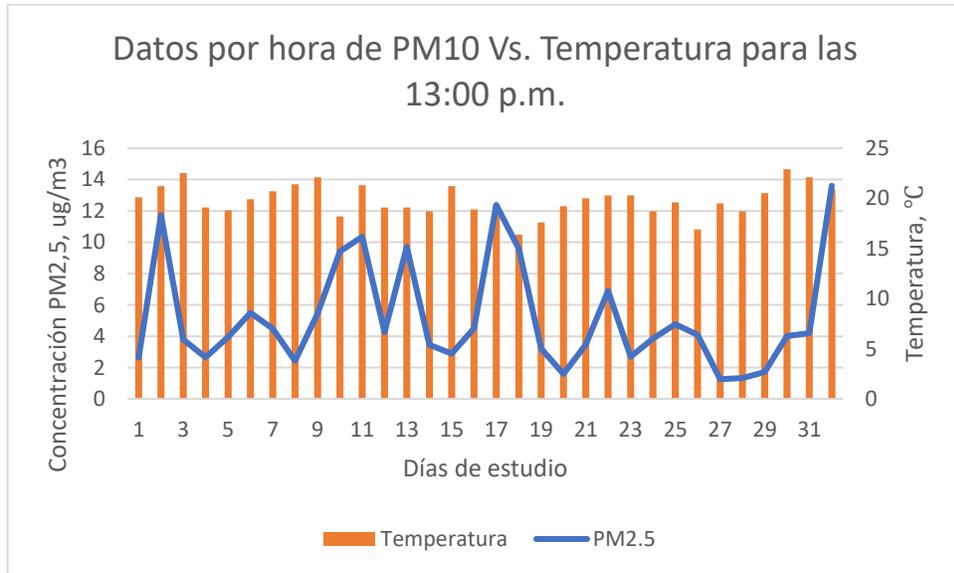
Fuente: Autor.

Gráfica 36 Comparación diaria entre PM2.5 y Temperatura para las 12:00 m.



Fuente: Autor.

Gráfica 37 Comparación diaria entre PM2.5 y Temperatura para las 13:00 p.m.



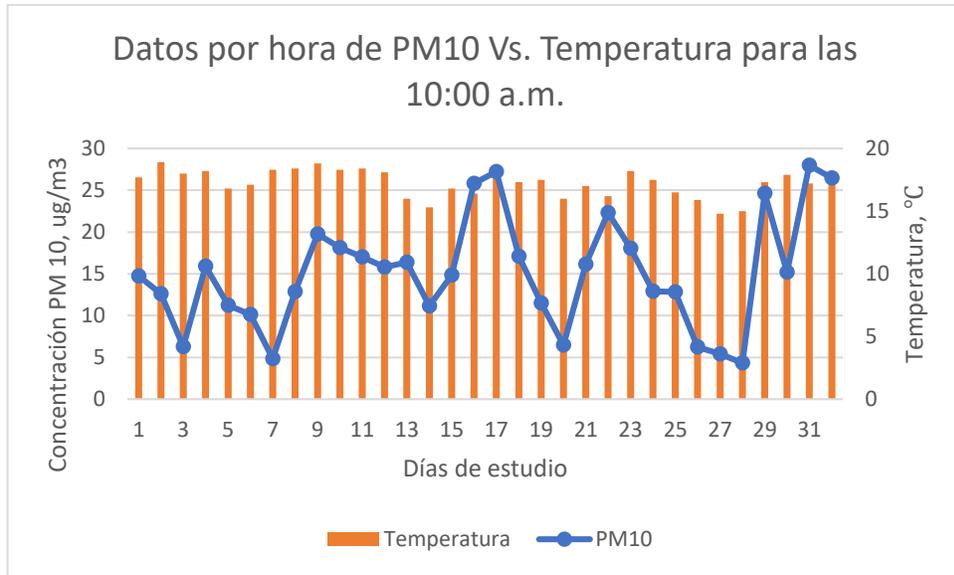
Fuente: Autor.

El Comportamiento en la temperatura para las tres primeras horas es el esperado como se ve en las **gráficas 34, 35 y 36**, donde la tendencia son relaciones bajas directamente proporcionales, con coeficientes Pearson en el rango (0.2-0.4), y

debido a la variación presentada a las 13:00 p.m., se obtuvo una relación bastante baja inversamente proporcional con un coeficiente de Pearson de -0.003969.

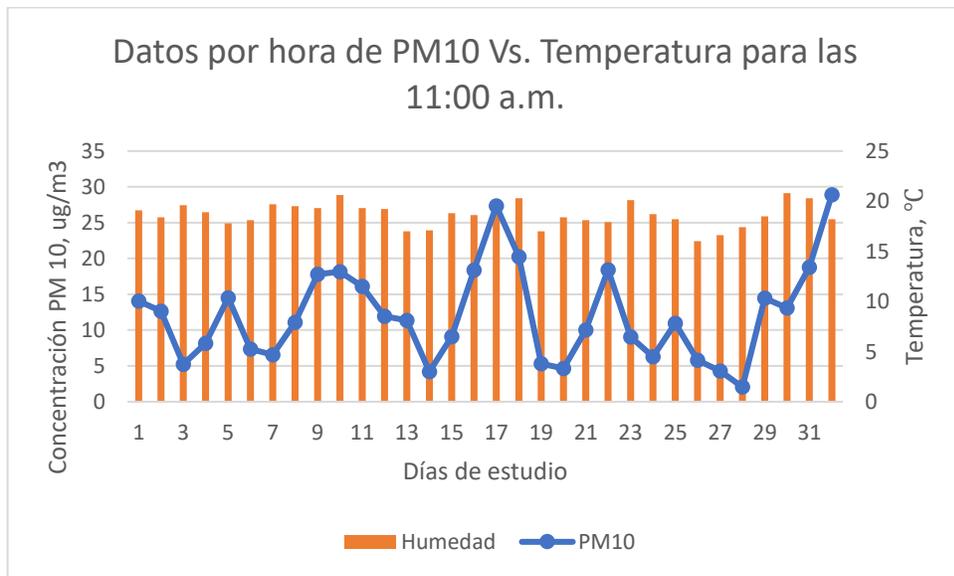
- PM10 Vs. Temperatura

Gráfica 38 Comparación diaria entre PM10 y Temperatura para las 10:00 a.m.



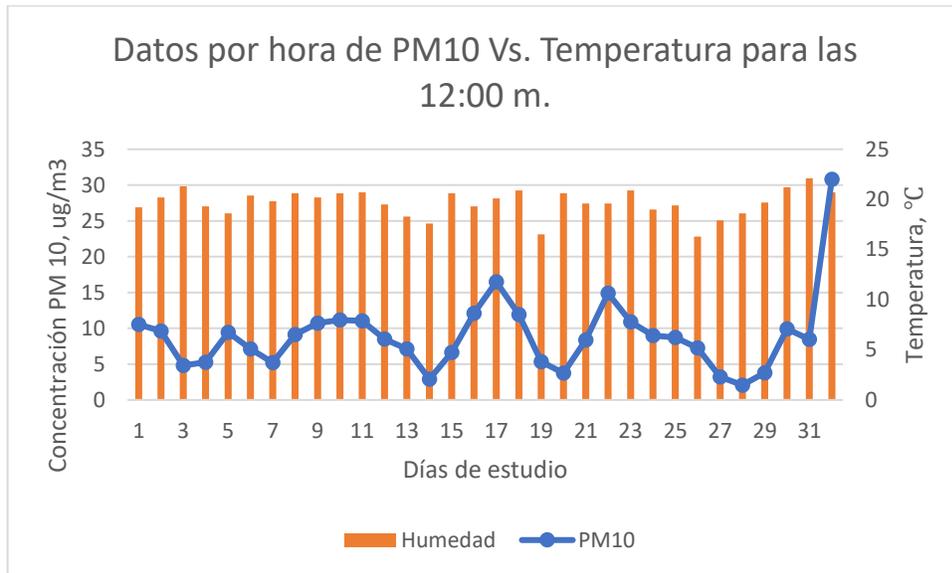
Fuente: Autor.

Gráfica 39 Comparación diaria entre PM10 y Temperatura para las 11:00 a.m.



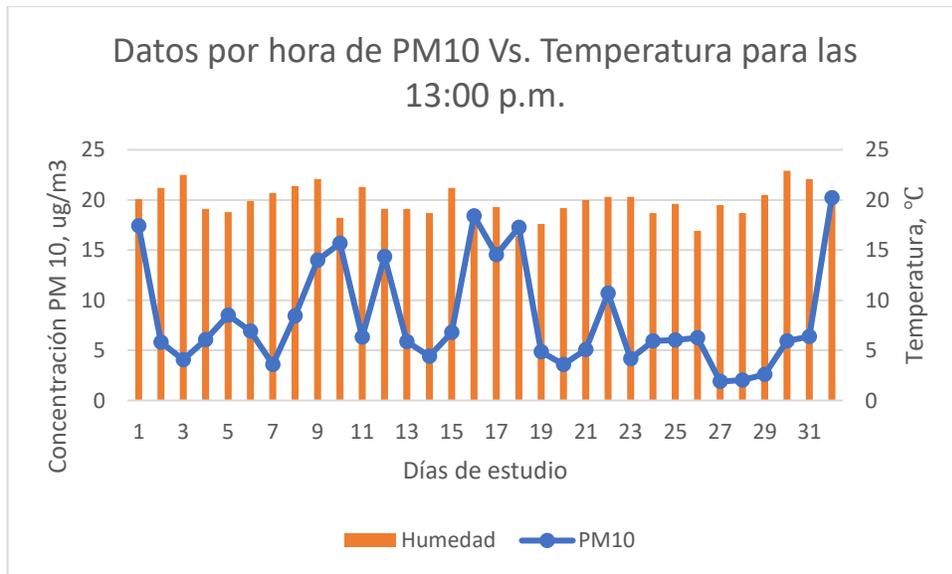
Fuente: Autor.

Gráfica 40 Comparación diaria entre PM10 y Temperatura para las 12:00 m.



Fuente: Autor.

Gráfica 41 Comparación diaria entre PM10 y Temperatura para las 13:00 p.m.



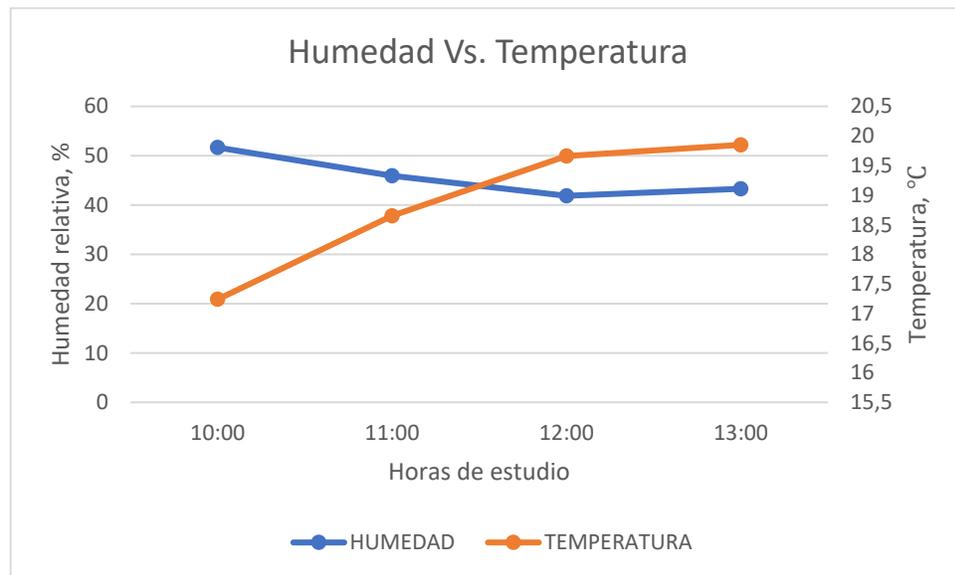
Fuente: Autor.

Para PM10 el comportamiento de las **gráficas 38, 39, 40 y 41**, es similar al que presenta el PM2.5 frente a la temperatura, con relaciones débiles directamente proporcionales entre variables, excepto para la 13:00 de la tarde donde el calor de

Pearson es de -0.1414, mostrando la tendencia de una relación débil inversamente proporcional para esta hora.

Para visualizar esta variante en las condiciones atmosféricas que la estación Fontibón de la RMCAB presenta, se promediaron hora a hora y se reflejaron los datos en la **gráfica 42** que se muestra a continuación.

*Gráfica 42 Comportamiento promedio hora a hora de la Humedad relativa y la Temperatura en el periodo de 5 horas estudiado*



**Fuente:** Autor.

Como se mencionó anteriormente, en la **gráfica 42**, se evidencia que para la última hora la humedad relativa mostró un leve aumento respecto a la hora anterior, por lo que se esperaría que la temperatura tuviera una disminución leve, sin embargo, esta tuvo también un sutil crecimiento respecto a la hora anterior. Este inusual comportamiento de las condiciones atmosféricas explica las variaciones en las tendencias del material particulado frente a la Humedad relativa y la temperatura, según lo expuesto por Bastidas (2019) en su investigación.

## 9. CONCLUSIONES

- A pesar de que el principio de medición del equipo de referencia de la Estación de Calidad del Aire Fontibón presenta mayores ventajas y a su vez muy diferente a los principios que posee el sensor Temtop M2000C, en la totalidad de los casos expuestos en este estudio el equipo de bajo costo tiene una tendencia similar en su comportamiento frente a la estación. A pesar de esta similitud, las concentraciones medidas por el equipo low cost, siempre estuvieron por debajo a la publicadas por la RMCAB, estando más cercas de los valores oficiales los días que presentaron bajas concentraciones de los contaminantes PM10 y PM2.5.
- Aunque el sensor se comporte de manera similar en las situaciones estudiadas, mostrando una tendencia de aumento y disminución en las concentraciones cuando la estación arroja este comportamiento, y estando siempre por debajo en el valor de ambos contaminantes, en los mismos periodos, se evidencia por medio de los análisis hora a hora, diarios y mensuales, que entre mayor cantidad de tiempo abarque el rango estudiado, el comportamiento del sensor tiende a ser más parecido al del equipo de referencia, es decir entre más datos se tengan para el estudio se evidencia mayor variabilidad en dicho comportamiento.
- Al relacionar los datos del sensor Temtop M2000C con el equipo de referencia de la estación para la medición de la calidad del aire de Fontibón, se evidencia por medio del coeficiente de Pearson y los análisis estadísticos aplicados en la investigación, que, en la mayoría de los casos estudiados, existe una relación directamente proporcional entre los equipos. Estas correlaciones al estudiarlas día a día durante el periodo de 4 horas escogido arrojaron valores en su gran mayoría por encima de 0.75 para el coeficiente de Pearson tanto para PM2.5 como para PM10. Sin embargo, al realizar el

análisis de manera mensual los valores del coeficiente de Pearson se elevaron a 0.9 para ambos contaminantes, demostrando que la tendencia mensual ofrece una correlación más fuerte con los datos del equipo de referencia.

- Se muestra por medio de las ecuaciones de calibración del sensor Temtop M2000C para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, las cuales involucraron como variables independientes la Humedad relativa y la Temperatura, que la concentración de los contaminantes poseen una relación relativamente alta con dichas variables, ya que al operar dichas ecuaciones se obtiene una regresión lineal alta, y también al calcular y comparar los índices de calidad de aire locales y nacionales muestran gran similitud con los valores que los promedios de los datos de la estación arrojan para cada uno de los contaminantes.
- En el período muestreado se cumplieron los límites de calidad del aire dados por la normatividad actual Resolución 2254 de 2017, ya que estuvieron por debajo de 37.5 µg/m<sup>3</sup> para PM 2.5 y 75 µg/m<sup>3</sup> para PM10.

## **10. RECOMENDACIONES**

En el futuro se podrían realizar más estudios con esta tecnología low cost, para poder mejorarla y afianzar su influencia en la medición de la calidad del aire, esto con el fin de aportar datos relevantes, eficientes y determinantes, para que se conviertan una herramienta fundamental para las autoridades pertinentes, en lugares donde el acceso a tecnologías de punta se dificulte ya bien sea por razones económicas o por la dificultad que pueda representar la geografía en una región para el arribo de los sistemas de vigilancia establecidos, y permitir a los entes reguladores tomar medidas de control y mitigación según se necesite.

También se podrían realizar estudios de esta naturaleza en diferentes circunstancias, con el fin de determinar si el comportamiento del sensor es el mismo en otro tipo de ambientes, como por ejemplo en una zona altamente industrializada, en actividades agrícolas y ganaderas, y en lugares cerrados y en sitios donde la contaminación sea baja, esto permitiría aprender más sobre los sensores basados en métodos ópticos y establecer nuevas variables que puedan interferir en la medición con estos equipos.

## 11. REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

- Bastidas, M. (2019). Predicción de comportamiento de PM2.5 del área urbana de Quito con métodos de inteligencia artificial. Quito, Ecuador.
- Bi, J., Stowell, J., Seto, E. Y. W., English, P. B., Al-Hamdan, M. Z., Kinney, P. L., ... Liu, Y. (2020). Contribution of low-cost sensor measurements to the prediction of PM2.5 levels: A case study in Imperial County, California, USA. *Environmental Research*, 180 (October 2019), 108810. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108810>.
- Cuitiva, A., Acosta, M., Rodríguez L., Altamar, A. & Aragón, J. (2019). Comparación de la calidad del aire por PM10 y PM2.5 con temperatura y precipitaciones en una zona aledaña a la Universidad Libre sede Bosque en Bogotá D.C.. *Retos en la información de ingenieros en la era digital*. Cartagena.
- Dagmar, R. (2004). Estudio e desenvolvimento de um sensor de CO2 de Baixo Custo. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Escola de Engenharia. Porto Alegre.
- Dagnino, S. (2014). Correlación, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. *Chil Anest*, 150-153
- Franco, M. C. B., Delgado, P. J. G., & Moreno, J. J. V. (2019) "Evaluación De La Calidad Del Aire En El Casco Urbano Del Municipio De Vijes - Valle," *Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASP)*, pp. 1
- Feenstra, B., Papapostolou, V., Hasheminassab, S., Zhang, H., Boghossian, B. Der, Cocker, D., & Polidori, A. (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM2.5 sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric Environment*, 216(September), 116946. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116946>
- Feinberg, S. N., Williams, R., Hagler, G., Low, J., Smith, L., Brown, R., ... Campbell, J. (2019). Examining spatiotemporal variability of urban particulate matter and application of high-time resolution data from a network of low-cost air pollution

- sensors. *Atmospheric Environment*, 213(June), 579–584.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.026>
- González Domínguez, M. E., Rueda Ygueravide, M. D., Gutiérrez Fernández, D., Gómez Gutiérrez, J. M., León Jiménez, A., & Pérez Álvarez, J. (2008). Exposición a contaminantes ambientales y patología respiratoria. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 54(213), 41–46. <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2008000400005>
- Gutiérrez, F. (2017). Desarrollo de un muestreador atmosférico de bajo costo y carácter didáctico. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga.
- Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2012). Formato Común Hoja Metodológica Índice de calidad del aire ( ICA ) Formato Común Hoja Metodológica. *Ideam*, 1–8.
- Joshua, S. (2020). State of Play of Low-Cost Sensors for Monitoring PM2.5, Texas, USA.
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., ... Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- Lancheros, D., Galvis, B. & Pachón, J. (2017). Dispositivo electrónico para la medición de la contaminación de la calidad del aire. *Ingenio Magno 8. (Vol. 8)*. Tunja Colombia.
- Liu, D., Zhang, Q., Jiang, J., & Chen, D. R. (2017). Performance calibration of low-cost and portable particular matter (PM) sensors. *Journal of Aerosol Science*, 112(March), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.011>
- Mazaheri, M., Clifford, S., Yeganeh, B., Viana, M., Rizza, V., Flament, R., ... Morawska, L. (2018). Investigations into factors affecting personal exposure to particles in urban microenvironments using low-cost sensors. *Environment International*, 120(August), 496–504.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.033>
- Mendoza, J. (2009). La medicion en el proceso de investigacion cientifica: Evaluacion de validez de contenido y confiabilidad. *Innovaciones de Negocios*, 6(1), 17–32.

- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Jubb, S. A., & Osammor, O. (2019). Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—a case study in Sheffield. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7231-8>
- Rico, K. (2018). Sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo Sonora. Universidad de Sonora. Hermosillo, México.
- Ríos, R. (2020). Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IOT. Universidad de La Salle, Bogotá Colombia
- Rojano, R., Pérez, J. & Freyle, E. (2012). Effect of relative humidity in determining PM10 using a DataRam 4 in coastal region of Colombia. *Revista Técnica de ingeniería*. Universidad de Zulia.
- Roncancio, L. (2019). Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire en Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.
- Sánchez, C., Bautista, M. (2019). Evaluación de la calidad del aire (PM10 y PM2.5) en relación a los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad de viento) en el sector Cercado- Tarapoto, 2018. Universidad Peruana Unión.
- Valencia, J. C., & Fonseca, O. (2019). Air pollution, citizen data collectives and communication agenda setting in Colombia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 236, 33–43. <https://doi.org/10.2495/AIR190041>

**Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.** EPA en español. *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. [En línea] EPA. [Citado el: 05 de Marzo de 2020.] <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>.

**IDEAM. 2016.** IDEAM. *Contaminación del Aire*. [En línea] IDEAM, 2016. [Citado el: 26 de Febrero de 2020.] <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.

**IDEAM. 2018.** IDEAM. *Informe de calidad del aire 2017*. [En línea] IDEAM, Julio de 2018. [Citado el: 5 de Mayo de 2020.] [http://www.andi.com.co/Uploads/Informe\\_ECalidadI\\_Aire\\_2017\\_636748401757382604.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Informe_ECalidadI_Aire_2017_636748401757382604.pdf).

**OEHHA. 2020.** CA.gov. [En línea] Gobernación de California, 2020. [Citado el: 5 de Mayo de 2020.] <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25>.

**Organización Mundial de la salud. 2019.** Organización Mundial de la salud. *Información básica sobre la contaminación atmosférica urbana*. [En línea] OMS, 2019. [Citado el: 23 de Febrero de 2020.] [https://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/background\\_information/es/](https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/background_information/es/).

**Organización Mundial de la Salud. 2016.** Organización Mundial de la Salud. *Calidad del aire y salud*. [En línea] Organización Mundial de la Salud, 2016. [Citado el: 22 de Febrero de 2020.] [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

**Organización Panamericana de la Salud. 2019.** Organización Panamericana de la Salud. *Conraminacion del aire ambiental*. [En línea] 2019. [Citado el: 23 de Febrero de 2020.] [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es).

**Semana. 2019.** Semana. *Como monitorear la calidad del aire en su ciudad*. [En línea] Semana, 25 de Septiembre de 2019. [Citado el: 03 de Marzo de 2020.] <https://www.semana.com/tecnologia/articulo/como-puede-monitorear-la-calidad-del-aire-en-su-ciudad/633212>.

**Sistema de Información Ambiental de Colombia. 2019.** SIAC. *Emisiones*. [En línea] IDEAM, 2019. [Citado el: 05 de Marzo de 2020.] <http://www.siac.gov.co/emisionesaire>.

**Temtop. 2013.** Temtop. *About Temtop*. [En línea] Temtop, 2013. [Citado el: 23 de Febrero de 2020.] <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/C1ouEgu0PpS.pdf>.

**Instituto Nacional de Ecología de México. 2012.** Sinaica. *Sinaica*. [En línea] Instituto Nacional de Ecología, 2012. [Citado el: 19 de Mayo de 2020.] <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>.—. SINAICA. [En línea]