

Diseño de Estación de Monitoreo de Material Particulado De Bajo Costo

Juan Carlos Flórez Triana

Daniel Antonio Bobadilla Giraldo

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Mg. en Potencia Eléctrica

Codirector

Ricardo Domínguez Gómez

Mg. en Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Dedicado a A mi padre y a mi madre por haber luchado día a día por mi formación como persona y como profesional; por aquellos consejos tan valiosos que hicieron de mí, alguien mejor. Y sin duda nunca olvidaré aquella frase que siempre me resaltaron “El estudio es la gran herencia que de seguro le podremos dejar”

A mi hermano por haber sido participe en mi formación académica, por sus consejos y palabras reconfortantes en aquellos momentos críticos por mi paso en la prestigiosa universidad industrial de Santander.

A Alejandra por ser pilar importante en mi vida, por el gran amor y la paciencia que me ha dedicado, haciendo de mí la mejor versión.

A Mis amigos y compañeros de la carrera, por haber hecho de mi estadía en la universidad una experiencia agradable y reconfortante.

A Daniel mi compañero de tesis por haber decidido realizar esta gran tarea conmigo, Ricardo por haber ofrecido siempre los mejores consejos para el desarrollo de la tesis.

En general a Dios, mi familia y amigos por haber deseado siempre lo mejor para mí, en mi carrera y en mi futuro y pido al cielo que se lleguen muchos más logros importantes para mi vida personal y profesional.

Juan Carlos Flórez Triana

Dedicado a Mis abuelos por apoyarme todos los días, por cuidarme siempre, por darme la fuerza diaria para poder cumplir mis metas.

Mi tío Dario por creer siempre en mi, por ser la persona que me hizo salir adelante con la carrera, el que me hizo dar cuenta de que siguiera mis sueños sin importar las dificultades.

Sebastian mi hermano, debido a que me ve como modelo a seguir es una de las razones las cuales me he esforzado tanto, y tam- bien a mi tía Laura que se preocupa tanto por mi, a mi mama por su apoyo a pesar de la distancia.

Juan Carlos mi compañero de proyecto porque sin el esto no hubiera sido posible, por su esfuerzo y sus ganas de aprender. Por mis amigos ya que todos han sido parte de mi formación y crecimiento y cada uno de ellos ha aportado su granito de arena para poder cumplir mis objetivos

Daniela Rueda porque ha sido ella la que me dio el impulso final para cumplir mis objetivos, por su apoyo incondicional que me ha dado, por su compañía y cariño

Daniel Antonio Bobadilla Giraldo

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos y Alcances	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 Alcances.....	19
1.3.1 Diseño de prototipo.....	20
1.3.2 Estrategia para mejorar la confiabilidad del dato.	20
1.3.3 Base de datos.....	20
2. Marco Teórico.....	20
2.1 Material particulado	20
2.2 Principio de funcionamiento de sensores de material particulado	22
2.2.1 Método gravimétrico.....	22
2.2.2 Contadores de partículas ópticos(OPC).	22
2.3 Estado del Arte.....	24
3. Diseño e implementación de hardware y software	28
3.1 Microcontrolador	28
3.1.1 Raspberry Pi Zero W.	29
3.2 Sensores de material particulado	31

3.2.1 TE-WILBUR (Tisch environmental).....	32
3.2.2 DusTtrak II 8530(TSI).	33
3.2.3 PMS 5003(Plantower).....	34
3.2.4 OPC-N2(Alphasense).	35
3.2.5 BME 280(Adafruit).....	37
3.3 RTC (Sparkfun)	38
3.4 Pantalla NX3224T024 TFT LCD	39
3.5 Algoritmos de adquisición, envío y recepción de datos	41
3.5.1 Adquisición de datos.....	41
3.5.2 Transmisión y recepción.	42
3.6 Circuito impreso.....	45
4. Pruebas y Toma de datos	46
4.2 Pruebas PM 2.5	47
4.2.1 Día sin carro.....	47
4.2.2 Jardín de las orquídeas UIS.....	48
4.2.3 Vía Girón.	49
4.2.4 Halley.....	51
4.3 Pruebas PM 10	52
4.3.1 Día sin carro.....	52
4.3.1.1 Prueba construcción UIS carrera 30.	53
4.3.2 Vía Girón.	54
4.3.3 Halley.....	55
4.4 Pruebas de humedad y temperatura OPC-N2 y PMS 5003	57

4.4.1 PM 10 (Aire acondicionado).....	57
4.4.1.1 Con perturbación.....	57
4.4.1.2 Sin perturbación.....	59
5. Resultados, ajustes y analisis	60
5.1. PM 2.5.....	60
5.2 Ajuste de las concentraciones de PM usando el método de R^2	62
5.2.1 Ajustes de pruebas PM 2.5.....	63
5.2.2 Carrera 33 con calle 52.	63
5.2.3 Jardín de las orquídeas UIS.....	65
5.2.4 Vía Giron.	66
5.2.5 Ajustes de pruebas PM 10.....	67
5.2.6 Carrera 33 con calle 52.	67
5.2.7 Construcción UIS.....	69
5.2.8 Vía Girón.	70
5.3 Análisis de resultados	71
6. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	73
Referencias Bibliográficas	76
Apéndices.....	79

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Clasificación del material particulado en la atmósfera urbana.	21
<i>Figura 2.</i> Esquema de los sistemas láser OPC.	23
<i>Figura 3.</i> Diagrama de ancho del pulso proporcional al tamaño de la partícula	23
<i>Figura 4.</i> Dispersión de Rayleigh y MIE.....	24
<i>Figura 5.</i> Tabla de comparación de consumo eléctrico de placas familia raspberry	28
<i>Figura 6.</i> Raspberry pi zero w.	29
<i>Figura 7.</i> TE-WILBUR.	32
<i>Figura 8.</i> DusTrack 8530.....	33
<i>Figura 9.</i> PMS-5003.	34
<i>Figura 10.</i> Conexión del PMS 5003	35
<i>Figura 11:</i> OPC-N2.	36
<i>Figura 12.</i> OPC-N2	36
<i>Figura 13.</i> Modulo BME-280.....	37
<i>Figura 14.</i> Diagrama de conexión del BME 280.....	38
<i>Figura 15.</i> Modulo Real Time Clock (RTC).....	39
<i>Figura 16.</i> Diagrama de conexion del RTC.....	39
<i>Figura 17.</i> Pantalla NX3224T024_011R - 2.4" TFT LCD TOUCH.....	40
<i>Figura 18</i> Diagrama de conexion de la pantalla NX3224T024.....	40

<i>Figura 19.</i> Nodo de adquisición de datos (NAD).....	41
<i>Figura 20.</i> Diagrama de flujo de algoritmo de programación de la Raspberry pi.....	42
<i>Figura 21.</i> Página web.....	44
<i>Figura 22.</i> Esquemático de conexión de los sensores con la raspberry pi zero w.....	45
<i>Figura 23.</i> Distribución de elementos en circuito impreso.....	46
<i>Figura 24.</i> Concentración de PM 2.5 de prueba en día sin carro en la carrera 33 con calle 52 de Bucaramanga con promedio de 1 minuto	47
<i>Figura 25.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 con promedio de 1 min de prueba carrera 33 con calle 52.	48
<i>Figura 26.</i> Concentración de PM 2.5 de prueba en el jardín de las orquídeas UIS frente a emisiones de carbón, cigarrillo e incienso con promedio de 1 minuto.	49
<i>Figura 27.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 con promedio de 5 min.	49
<i>Figura 28.</i> Concentración de PM 2.5 de prueba vía Girón con promedio de 5 minutos.....	50
<i>Figura 29.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 con promedio de 5 minutos de prueba en vía Girón.	50
<i>Figura 30.</i> Concentración de PM 2.5 de prueba grupo Halley.....	51
<i>Figura 31.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 de prueba en grupo Halley.	51
<i>Figura 32.</i> Concentración de PM 10 de prueba día sin carro en la carrera 33 con calle 52 de Bucaramanga.....	52
<i>Figura 33.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de PM 10 de prueba día sin carro en la carrera 33 con calle 52 de bucaramanga.	53

<i>Figura 34.</i> Datos de prueba de corta duración PM10 de prueba construcción UIS carrera 30. ...	53
<i>Figura 35.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 10 con promedio móvil de 5 min de prueba construcción UIS carrera 30.	54
<i>Figura 36.</i> Concentración de PM 10 de prueba en vía Girón, con promedio de 5 minutos	55
<i>Figura 37.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 10 [ug/m3] con promedio móvil de 5 min de prueba construcción UIS carrera 30.....	55
<i>Figura 38.</i> Concentración de PM 10 con promedio móvil de 5 minutos de prueba terraza de edificio de ciencias humana UIS.....	56
<i>Figura 39.</i> Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 10 con promedio móvil de 5 min, prueba terraza del edificio de Ciencias Humanas UIS.	56
<i>Figura 40.</i> Concentración de PM 2.5 de prueba de 24 horas en aire libre.	57
<i>Figura 41.</i> Concentración de PM 10 de prueba con perturbación(parte 1) en aire acondicionado	58
<i>Figura 42.</i> Concentración de PM 10 de prueba con perturbación(parte 2) en aire acondicionado.	59
<i>Figura 43.</i> Concentración de PM 10 de prueba sin perturbación en aire acondicionado.	60
<i>Figura 44.</i> Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-N2) de prueba carrera 33 con calle 52.....	64
<i>Figura 45.</i> Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS 50003) de prueba carrera 33 con calle 52.	64
<i>Figura 46.</i> Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-N2) de prueba en jardín de las orquídeas.	65
<i>Figura 47.</i> Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS	

5003) de prueba en jardín de las orquídeas..... 65

Figura 48. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste

(OPC-N2) de prueba en vía Girón. 66

Figura 49. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS

5003) de prueba en vía Girón..... 66

Figura 50. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (PMS

5003). 68

Figura 51. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (OPC-

N2). 68

Figura 52. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (PMS

5003). 69

Figura 53. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (OPC-

N2). 69

Figura 54. Concentración PM 10 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS

5003). 70

Figura 55. Concentración PM 10 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-

N2). 70

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Características TE-WILBUR</i>	33
Tabla 2. <i>Características DusTtrak</i>	34
Tabla 3. <i>Características PMS 5003</i>	35
Tabla 4. <i>Características OPC-N2</i>	37
Tabla 5. <i>Características BME-280</i>	38
Tabla 6. <i>Resultados de las pruebas realizadas de PM 2.5</i>	61
Tabla 7. <i>Resultados de las pruebas de PM 10.</i>	61
Tabla 8. <i>Comparación de RMSE antes y después del ajuste</i>	71

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Códigos de programación usados para la lectura de los sensores y envío de <i>datos a la nube</i>	79
Apéndice B. Gráficas de concentración de PM de todas las pruebas realizadas	95
Apéndice C Ecuaciones para el cálculo de las variables estadísticas	100

Resumen

Título: Diseño de estación de monitoreo de material particulado de bajo costo*.

Autores: Juan Carlos Florez Triana,
Daniel Antonio Giraldo Bobadilla**

Palabras Clave: Material particulado, Sensores de bajo costo, Estación de monitoreo, Calidad del aire, IOT.

Descripción:

Analizando el crecimiento industrial de las ultimas décadas, se reconoce un panorama a futuro poco alentador relacionado a la calidad del aire a nivel mundial. Por esta razón este sería el momento adecuado para aplicar esfuerzos mancomunados por parte de disciplinas de las ingenierías en la mejora de los índices de calidad del aire. Y es por esto que desde la electrónica se investiga cada vez más la forma de cuantificar la contaminación ambiental, para así ofrecer herramientas especializadas a entes organizaciones que tengan acción directa con esta problemática.

En este proyecto se realiza la caracterización de dos sensores ópticos de bajo costo (OPC-N2 y PMS 5003) respecto a un equipo de referencia Dusttrak. Se observo la correlación de las mediciones de PM del PMS 5003 y DEL OPC-N2 al calcular el coeficiente de determinación R^2 , los resultados arrojan que hay hay mejor correlación de los sensores a bajas concentraciones de PM además de que el PMS 5003 responde mejor en la mayoría de las pruebas (R^2 entre 0.6 y 0.9). este análisis se realizo con la intención de diseñar una estación de monitoreo que sea capaz de cuantificar la concentración de material particulado (PM por sus siglas en inglés) de una forma confiable, aplicando ajustes a los datos adquiridos.

Además se intentó encontrar la posible relación de la humedad y temperatura relativa en el desempeño de estas dos referencias de sensores ópticos, encontrando una afectación de estas dos variables en el comportamiento de ambos equipos. No fue posible realizar un ajuste de humedad y temperatura ya que no se contaron con condiciones especializadas de laboratorio..

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Mg. en Potencia Eléctrica. Codirector: Ricardo Domínguez Gómez, Mg. en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Design of low cost particulate material monitoring station*.

Authors: Juan Carlos Florez Triana
Daniel Antonio Bobadilla**

Key Words: Light scattering, Relative humidity, Relative temperature, Hygroscopic growth, Linear regression, IOT.

DESCRIPTION:

Analyzing the industrial growth of the last decades, an uninviting future panorama related to air quality worldwide is recognized. For this reason, this would be the right time to apply joint efforts by engineering disciplines to improve air quality indices. And this is why from the electronics the way to quantify environmental pollution is increasingly investigated, in order to offer specialized tools to organizations that have direct action with this problem.

In this project, the characterization of two low-cost optical sensors (OPC-N2 and PMS 5003) is carried out with respect to a Dusttrak reference device. The correlation of the PM measurements of the PMS 5003 and the OPC-N2 was observed when calculating the coefficient of determination R^2 , the results show that there is a better correlation of the sensors at low PM concentrations in addition to the PMS 5003 responding better in most tests (R^2 between 0.6 and 0.9). This with the intention of designing a monitoring station that is capable of quantifying the concentration of particulate material (PM) in a reliable way, applying adjustments to the acquired data.

In addition, we tried to find the possible relationship of humidity and relative temperature in the performance of these two optical sensor references, finding an affectation of these two variables in the behavior of both teams. It was not possible to adjust the humidity and temperature since there were no specialized laboratory conditions..

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Advisor: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Mg. en Potencia Eléctrica. Co Advisor: Ricardo Dominguez Gómez Mg. en Ingeniería Eléctrica.

Introducción

A lo largo de la historia han estado presentes un gran número de factores contaminantes influyentes en la calidad del aire mundial, los cuales se asocian a orígenes de infecciones respiratorias, cáncer pulmonar, asbestosis y silicosis. Frente a esta realidad, las ciencias aplicadas como las ingenierías han realizado esfuerzos significativos que aportan a la resolución de esta problemática. Uno de los avances más relevantes es la capacidad instrumental en la cuantificación de la concentración del material particulado, aportando un índice representativo de la calidad del aire. En esta línea de medición se cuenta con una amplia variedad de sensores, diferenciados principalmente por su método de sensado (principio físico, involucrando su exactitud-sensibilidad), condiciones de trabajo (temperatura, humedad, concentraciones máximas y mínimas); haciendo que sus precios varíen en gran medida.

En el mercado existe una amplia variedad de equipos capaces de sensor concentración de PM de una forma confiable. Existen referencias con un bajo consumo eléctrico, lo que facilita la practicidad del trabajo en campo realizado por el usuario. Estos equipos cuentan con la capacidad de realizar un muestreo automático y en algunas referencias una visualización de datos de forma remota, como es el caso del DUSTTRAK II 8530 (INNOVATION, 2011). Este equipo además de contar con las ventajas ya mencionadas, permite realizar muestreo gravimétrico con un cartucho extraíble de 37 mm. Su elevado precio, es una variable a tener en cuenta si se contempla la posibilidad de implementar una red de monitoreo “conformado por múltiples sensores” con este tipo de equipo, su costo sería un factor desfavorable.

En este sentido, resulta pertinente preguntar ¿sería posible implementar una red de monitoreo de calidad del aire de bajo costo manteniendo una confiabilidad comparable con la de un sensor de alta gama? Así, la presente investigación busca diseñar una estación de monitoreo haciendo uso de sensores que están bien referenciados (Rai y cols., 2017); como la nueva generación de sensores de PM ópticos de bajo costo (LC low cost por su abreviatura en inglés) (Lewis y cols., 2016),(Emily G. Snyder, 2013). Siendo estos sensores (OPC-N2 y PMS 5003) una opción favorable para realizar una validación de los datos con el sensor DUSTTRAK II 8530, el cual se tomará como equipo patrón, de esta manera se calculará el error de los sensores LC, y de ser necesario se realizaría un ajuste de datos para minimizarlo, con el fin de desarrollar una estación de monitoreo versátil que pueda ser replicada para la posible implementación de una red de monitoreo que ofrezca un desempeño confiable al compararlo con el equipo patrón

1. Objetivos y Alcances

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de monitoreo de concentración de material particulado PM2.5 Y PM10 utilizando sensores de bajo costo.

1.2 Objetivos Específicos

- Adquirir dos sensores de PM, un OPC-N2 y un PMS 5003 para implementar un sistema de monitoreo portátil utilizando una tarjeta Raspberry PI Z.
- Realizar pruebas en diferentes zonas de la ciudad utilizando el sistema de monitoreo portátil conformado por los 2 sensores de PM ya estipulados, con el fin de comparar los datos de los sensores con distintas concentraciones de material particulado y analizar su comportamiento bajo la influencia de variables ambientales, tales como temperatura y humedad.
- Analizar los datos obtenidos para estimar el error al comparar estas lecturas con un DUSTTRAK II 8530 (TSI) y realizar procesamiento digital para minimizar errores.

1.3 Alcances

Con este trabajo se desea desarrollar un prototipo de estación de monitoreo de concentración de PM en tiempo real. La información previamente, será procesada y almacenada en una base de datos desarrollada por los autores, para su respectiva visualización y análisis. El proyecto se desarrolló con los sensores que han sido facilitado por una alianza entre los grupo si3c-cemos-halley por la participación en un proyecto de colciencias(RACIMO). El prototipo estará sujeta a la disponibilidad del sensor OPC-N2.

1.3.1 Diseño de prototipo. Se entregará un diseño de la estación de monitoreo, no se garantiza la entrega de un prototipo con todos los sensores, porque como se manifestó anteriormente, el OPC-N2 no es de propiedad de los autores y su precio es elevado para ser asumido por los autores.

1.3.2 Estrategia para mejorar la confiabilidad del dato. regresio- nes polinómicas.

1.3.3 Base de datos. El sistema almacenará y transmitirá la información utili- zando Wi-Fi. Si no existe una red Wi-Fi disponible se almacenarán dichos datos. Si existe una red Wi-Fi lo almacenado queda de respaldo.

2. Marco Teórico

2.1 Material particulado

Se denomina PM a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. El material particulado forma parte de la contaminación del aire. Su composición es muy variada y podemos encontrar, entre sus principales componentes, sulfatos, nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales, cenizas metálicas y agua.

Se cataloga en función de su tamaño y en el ámbito de la calidad del aire, hablamos de partículas PM 10, que serían las de mayor tamaño, cuya diámetro aerodinámico teórico sería de 10 [μm]

(micrones de metro = millonésima parte del metro) y las partículas finas conocidas como PM 2.5 cuyo diámetro sería de 2.5 [μm].

El PM es uno de los seis criterios de contaminantes del aire de 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 u otras actividades.

Se denomina partículas de PM 10 a pequeñas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera. Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono.

A lo largo del desarrollo del informe se hará uso de términos como **PM 2.5** y **PM 10** para describir las concentraciones por defecto en [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] de partículas de diámetro de 2.5 [μm] y 10 [μm] respectivamente.

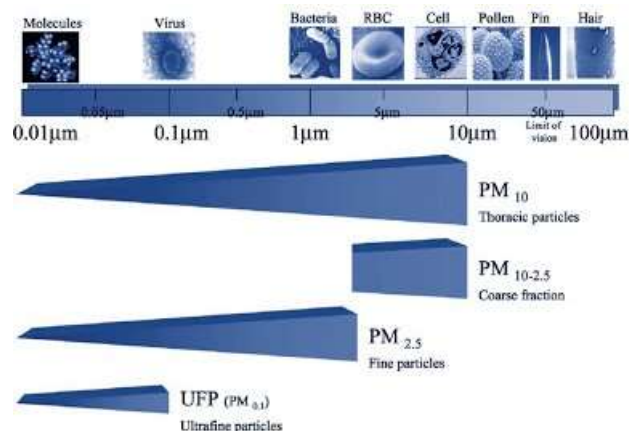


Figura 1. Clasificación del material particulado en la atmósfera urbana. Nota. Tomado de: Ecologistas en acción (s.f.) Que son las PM y como afectan a nuestra salud Recuperado de: <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>

2.2 Principio de funcionamiento de sensores de material particulado

2.2.1 Método gravimétrico. Este método consiste en la captación de partículas del ambiente con el uso de una bomba con determinado flujo de aire, posterior a esto, se realiza una clasificación del tamaño de las partículas y finalmente se depositan en un filtro.

Este filtro requiere de un controlador de temperatura para lograr una temperatura de alrededor de 25°C. Este método requiere de pruebas idealmente de larga duración, para lograr captar suficiente PM y obtener una medida representativa de la calidad del aire del lugar evaluado. Finalizada la prueba el filtro debe pasar por un proceso de secado, desmagnetización y posterior pesado.

2.2.2 Contadores de partículas ópticos(OPC). Las mediciones de partículas con instrumentos ópticos se basan en el hecho de que cuando una partícula pasa a través de un haz de luz, parte de la luz se dispersa. La detección de esta luz dispersa es la base de todos estos instrumentos. El número de partículas se puede determinar simplemente contando los pulsos de luz dispersa que llegan al detector. La intensidad de la luz dispersa está relacionada con el tamaño de la partícula y esta relación se puede utilizar para realizar mediciones del tamaño de partícula (for Atmospheric Science, 2017).

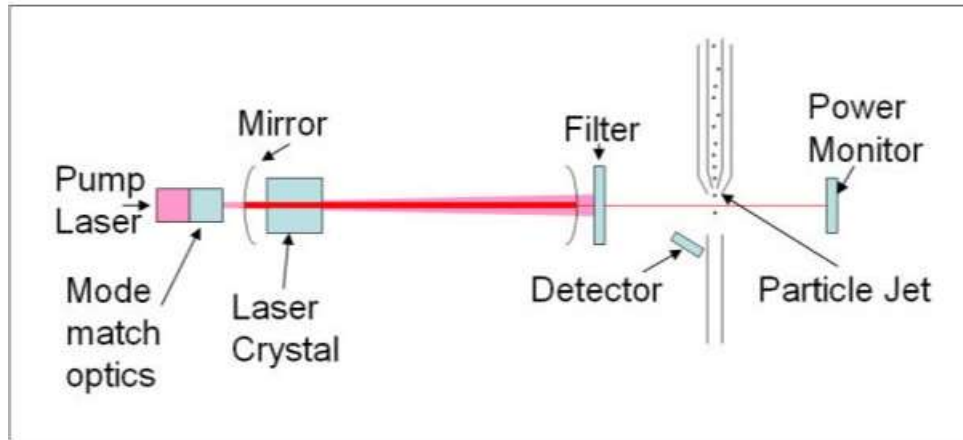


Figura 2. Esquema de los sistemas láser OPC. Nota. Tomado de: Manchester (s.f.) Aerosol
Recuperado de: <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/opc/>.

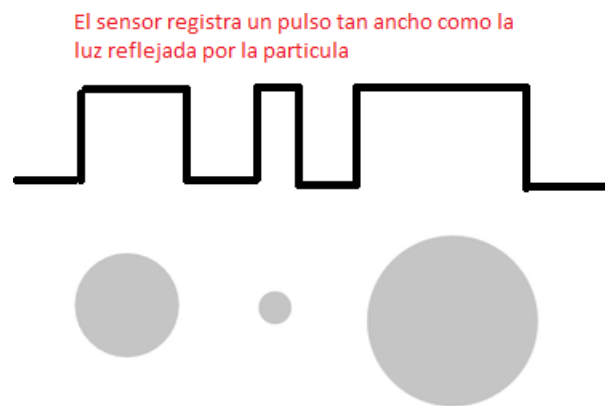


Figura 3. Diagrama de ancho del pulso proporcional al tamaño de la partícula

Este principio se basa fundamentalmente en dos teorías, cuando la longitud de onda de la luz es mayor al radio de la partícula, ocurre lo que se conoce como dispersión de Rayleigh y cuando la longitud de onda es similar al radio de la partícula, dispersión de MIE (Glantschnig y Chen, 1981)

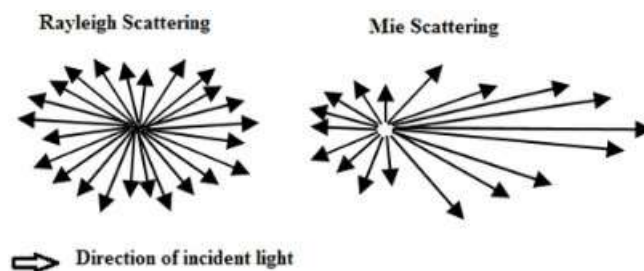


Figura 4. Dispersión de Rayleigh y MIE. Tomado de: Hyper physics (s.f.) Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/atmos/blusky.html>

2.3 Estado del Arte

Los sensores de LC representan una gran oportunidad para crear redes de monitoreo de contaminantes gaseosos y de PM en grandes áreas sin la necesidad de interpolación. Sin embargo, todavía existen desafíos con respecto a su uso, principalmente la calidad de los datos, la comparabilidad y derivación de información significativa de conjuntos de datos (Castell, Viana, Minguillón, Guerreiro, y Querol, 2013). Por este motivo, el foco de investigación en la implementación de sensores de LC radica en dar la validez y confiabilidad de los datos adquiridos.

Uno de los desafíos principales con sensores de calidad del aire de LC es la calibración a las concentraciones de contaminantes y condiciones ambientales típicos. Estos sensores son propensos a las sensibilidades cruzadas con otros contaminantes ambientales (Bart y cols., 2014), (Cross y cols., 2017), (Masson, Piedrahita, y Hannigan, 2015). La ciencia está interesada en comprender las limitaciones de estos sensores en términos de sensibilidad, límites de detección superior e inferior, variabilidad de sensor a sensor y la dinámica de su respuesta a concentraciones cambiantes (N Carvlin y cols., 2017)

Las estaciones reguladoras de Monitoreo de Calidad de Aire (AQM, del acrónimo en inglés) requieren instrumentación certificada que cumpla con los requisitos de precisión de medición y un amplio conjunto de procedimientos para garantizar que la calidad de los datos siga siendo satisfactoria. Estos requisitos, generalmente exigidos por las leyes de regulación, aseguran que las mediciones sean comparables en todas las redes con requisitos similares, pero limitan la implementación espacial de AQM debido a su alta inversión y costo operacional. Como resultado, la red de AQM tiene una capacidad limitada para dar cuenta de la variabilidad espacial de los niveles de contaminación en regiones heterogéneas como las áreas urbanas, lo que a cambio hace que la evaluación de la exposición sea una tarea difícil (Fishbain y cols., 2016), (Rao y cols., 2012).

Los monitores de LC podrían proporcionar una vigilancia ambiental intensiva que produzca información cualitativa y confiable para un área de interés (Kumar y cols., 2015), siempre y cuando los datos estén validados y bien caracterizados científicamente. La mayoría de los monitores de PM de LC actuales se basan en la dispersión de la luz, proporcionando una señal indicativa de la concentración de masa de PM. Debido a su bajo precio, se pueden implementar múltiples instrumentos para la caracterización de PM con una mayor resolución espacial y temporal pudiéndose utilizar para la vigilancia de puntos críticos (Zíková, Hopke, y Ferro, 2016).

Por estas razones, las EM (estaciones de monitoreo) necesitan calibraciones frecuentes. Esto requiere el desarrollo de procedimientos de calibración de campo adecuados y donde se hace necesario tales calibraciones de campo in situ. La calibración de laboratorio se realiza en una atmósfera controlada (temperatura, humedad relativa, aire inmóvil, principalmente un contaminante a la vez, etc.) y crear esta atmosfera controlada es de alta dificultad. Esta configuración de laboratorio es muy diferente de las condiciones que los sensores realmente experimentan cuando se implementan en entornos urbanos. Ej: efectos de la velocidad del sensor o

de las ráfagas de viento sobre su rendimiento pueden ser sustanciales (Broday y Jovašević-Stojanović, 2017). Los efectos de la sensibilidad cruzada y la estabilidad en el rendimiento del sensor son complejos. Los modelos de calibración lineal desarrollados en el laboratorio tienen un rendimiento bajo en los datos ambientales (Castell y cols., 2016).

Para estandarizar estas pruebas de calibración, la EPA ha generado una lista de referencia designada y métodos equivalentes de calibración (United States Environmental Protection Agency, 2016a). Estos métodos para medir las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos especificados se han designado como “métodos de referencia” o “métodos equivalentes” de acuerdo con el Título 40, Parte 53 del Código de Regulaciones Federales -CFR, por su acrónimo en inglés- (Code Federal Regulation 40 CFR Part 53, 2017). Sujeto a cualquier limitación (por ejemplo, rango operativo o rango de temperatura) especificado en la designación aplicable, cada método es aceptable para su uso en sistemas de vigilancia de calidad del aire estatales o locales bajo el título 40 CFR Parte 58 (Code Federal Regulation 40 CFR Part 58, 2017) a menos que la designación aplicable sea cancelada posteriormente (United States Environmental Protection Agency, 2016a)

Típicamente, el rendimiento de estos dispositivos en EM se evalúa usando el error medio o los coeficientes de correlación con respecto a un equipo de laboratorio. Sin embargo, estos criterios no representan la forma en que dichos sensores funcionan fuera de las condiciones de laboratorio en aplicaciones de campo a gran escala y no cubren todos los aspectos de las posibles diferencias en el rendimiento entre el equipo basado en sensores y estandarizado o los cambios en el rendimiento a lo largo del tiempo (Fishbain y cols., 2016)

En la investigación realizada en el año 2015 (Austin, Novosselov, Seto, y Yost, 2015) se tuvo un caso de prueba del sensor Shinyei PPD42NS en condiciones de laboratorio para contar PM

comparado con el sensor BAM-FEM en exposición de una cámara, las mediciones a largo plazo (aproximadamente 4 meses) indicaron una correlación más baja, pero aun moderada- mente buena. Además, se implementó en un entorno urbano de alta concentración junto con métodos ópticos y gravimétricos de referencia y se demostró que tiene una buena correlación.

En artículo publicado en el año 2017 por Broday (Broday y Jovašević-Stojanović, 2017) se realizó la caracterización de 4 sensores electroquímicos (AlphaSense). La EM contenía un sensor de PM, mini contadores de partículas ópticas -OPC- Dyllos 1700 DC. Implementó algoritmos que convirtió los recuentos de partículas específicos del tamaño en PM, asumiendo la forma esférica de partículas y la densidad estándar. Otros algoritmos para el procesamiento posterior de los registros del sensor observado, con el objetivo de corregir la interferencia cruzada y los efectos de la temperatura y la humedad relativa.

En el mercado actual existe una gran variedad de equipos de LC como lo son el DN7C3CA006, SHINYEI PPD42NS, GP2Y1010AU0F, PMS-1003, OPC-N2 entre otros. Estos sensores han tenido gran auge en los últimos años debido a su sencillez en cuestión de programación, tamaño y bajo consumo eléctrico (Rai y cols., 2017).

Partiendo del estudio de una variedad de sensores de bajo costo (Kumar y cols., 2015), se logra concluir que para el sensor SHINYEI PPD42NS se obtiene un coeficiente de determinación R^2 que oscila en el intervalo de 0.50 a 0.80, el DN7C3CA006 cuenta con un R^2 que oscila entre 0.95 a 0.99 pero tiene la desventaja que se deben calibrar solo para un tipo de partícula, pero aun así después de ser calibrados es una opción viable para su implementación en el proyecto. Por último se determina que el PMS-1003 es el de mejor desempeño ya que en condiciones urbanas arroja un R^2 que oscila dentro en el intervalo de 0.69 a 0.99, de igual manera ocurre con el OPC-N2 el cual en condiciones de laboratorio arroja un R^2 que oscila dentro en el intervalo de 0.94 a 0.99.

Como conclusión el PMS-1003 y el OPC-N2 son sobresalientes de una gran variedad de sensores de bajo costo. Es por esto que para este proyecto se implementa un PMS-5003 (de la familia del PMS-1003) y un OPC-N2.

3. Diseño e implementación de hardware y software

3.1 Microcontrolador

La selección de un microcontrolador para el desarrollo de este proyecto estuvo ligada costo, procesamiento y bajo consumo. De esta manera se tienen varias opciones como por ejemplo un ESP32, ARDUINO MEGA, RASPBERRY PI ZERO W entre otros.

Comparando las prestaciones de estas tres tarjetas programables se observa que la rasp- berry pi zero w supera al ARDUINO MEGA por su reducido tamaño y supera en capacidad de procesamiento y versatilidad de lenguajes de programación a ambos microcontroladores.

	Zero	Zero W	A+	A	B+	B	Pi2B	Pi3B
	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA
Idling	100	120	100	140	200	360	230	230
Loading LXDE	140	160	130	190	230	400	310	310
Watch 1080p Video	140	170	140	200	240	420	290	290
Shoot 1080p Video	240	230	230	320	330	480	350	350

Figura 5. Tabla de comparación de consumo eléctrico de placas familia raspberry Tomado de: REDES@ZONE. Disponible en: <https://www.redeszone.net/2017/03/02/energia-consumida-raspberry-pi>.

3.1.1 Raspberry Pi Zero W. El microcontrolador raspberry pi zero w v1.1 producido por SPARK FUN ELECTRONICS cuenta con un procesador de 32 bits a una frecuencia de reloj de 1GHz, modulo WiFi y Bluetooth. La versatilidad de su sistema embebido basado en debian (referencia) (*Raspbian*) ofrece la posibilidad de programar en lenguajes tales como JAVASCRIPT, PHYTON, C/C++, IDE ARDUINO entre otros.

Tiene un microprocesador Broadcom BCM2835, que funciona a 1GHz con un solo núcleo.

Posee 512MB de RAM, y comparte la gráfica VideoCore IV. Debido a su tamaño sustituye el puerto HDMI por MiniHDMI, manteniendo así las prestaciones. Tampoco usa USB estándar, sino que tiene dos MicroUSB, uno de alimentación y otro de datos, esta placa cuenta con modulo Wi-Fi y Bluetooth.

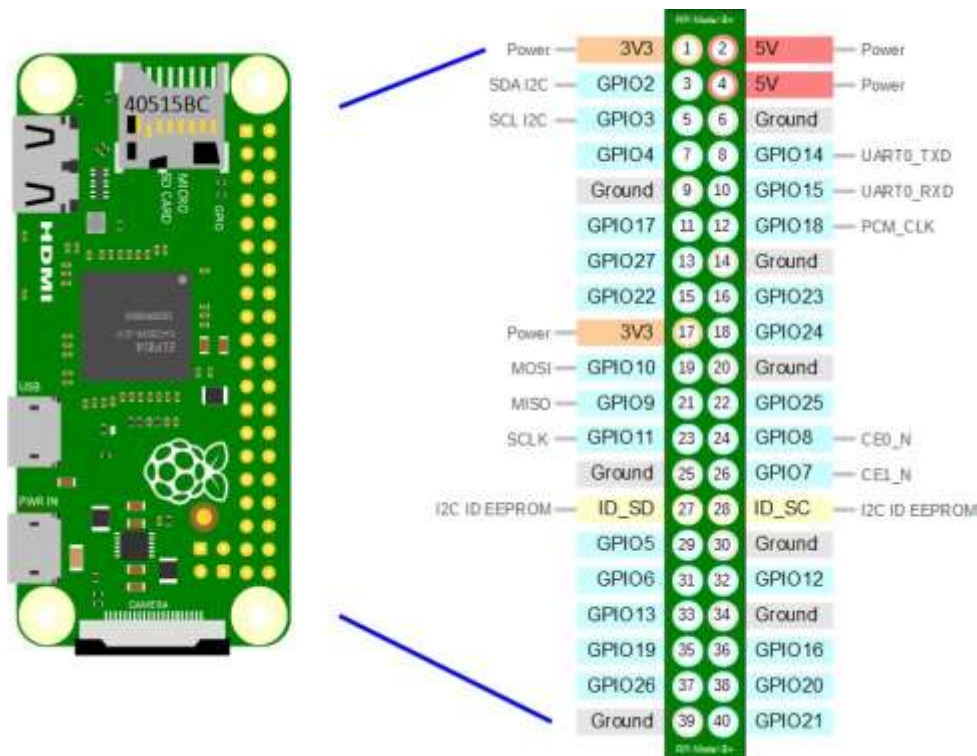


Figura 6. Raspberry pi zero w. Nota. Tomado de: Lean pub (s.f.) Recuperado de: <https://leanpub.com/siteimages/jerpi/rpiZ - 08.png>

A continuación se mostrará a detalle las especificaciones de hardware y software con las que cuenta la raspberry pi zero w v1.1 que fueron relevantes para el desarrollo de la tesis.

- Memoria RAM de 512 MB, arquitectura de procesamiento de 32 bits con un microprocesador BCM2835 con un núcleo ARM1176JZF-S, módulo WiFi/Bluetooth de 2.4 GHz.
- Cuenta con 40 pines de los cuales 12 corresponde a pines de alimentación y los restantes ofrecen propósitos específicos; 17 GPIOs y 11 pines dedicados a protocolos de comunicación tales como SPI, I2C, UART además ofrece la versatilidad de modificar el propósito de cualquier GPIO para uso de algún protocolo de comunicación de los ya mencionados o salida PWM, esto se logra con la manipulación la función de los periféricos "Página 102 de BCM2835 ARM Peripherals".
- Salida mini HDMI la cual facilita la implementación de una pantalla externa, un puerto micro USB la cual permite utilizar herramientas con el uso de multiplexor de entradas usb tales como mouse, teclado, memorias usb y adaptadores de fines específicos, una entrada SD con el fin de introducir su unidad de almacenamiento y sistema operativo.
- Bajo consumo de corriente; Figura 3.2 al rededor de 120 [mA] en reposo y a 230 [mA] en su máximo rendimiento y por ultimo un costo de alrededor de \$173.599 pesos colombianos, un precio considerablemente bajo si se tienen en cuenta las características anteriormente mencionadas.

Ahora bien, como se había mencionado anteriormente una raspberry tiene la posibilidad de programarse con una gran variedad de lenguajes; unos mas robustos que otros. En el proyecto se selecciona PYTHON por su simplicidad y organización, porque omite la declaración de tipos de variables y el manejo de espacios de memoria como sucede con otros lenguajes tales como C, C++ ya que esto lo realiza el interprete, además una gran ventaja es que existe una gran comunidad a

nivel mundial que enriquezca de manera significativa la documentación relacionada con cualquier aplicación tecnológica.

Una desventaja de este lenguaje en comparación a otros es que al ser un lenguaje de alto nivel es un poco mas lento porque contiene un interprete y no lo ejecuta directamente el procesador, pero esto es relevante en algoritmos que exigen una muy alta velocidad de iteraciones, Pero este no es el caso ya que el desempeño del algoritmo no se verá afectado por la frecuencia de muestreo de la estación porque ya de por si las referencias de sensores de LC requieren un tiempo de establecimiento entre muestras de al rededor de 10 segundos(Alphasense, abril 2015)(Yong, 2016).

3.2 Sensores de material particulado

En el mercado actual existe una gran variedad de sensores dedicados al sensado de la calidad de aire, lógicamente unos más precisos que otros; debido a su método de medición, robustez, arquitectura computacional entre otras características. Por ejemplo si se habla del método de sensado por gravimetría existen equipos referentes como lo son el BAM-1020 o el DUSTTRACK II 8530, método que garantiza una gran precisión, dicha precisión hace que equipos de este tipo sean pocos accesibles para implementar una red de monitoreo. Si se analizan los que hacen uso de la dispersión de luz como sucede con la mayoría de sensores de bajo costo como lo son el DN7C3CA006, SHINYEI PPD42NS, GP2Y, PMS-5003, OPC-N2 estos sensores han tenido gran auge en los últimos años debido a su sencillez en cuestión de programación, tamaño, bajo consumo eléctrico y sobre todo por su asequibilidad.

3.2.1 TE-WILBUR (Tisch environmental). Este es el recolector de partículas de bajo volumen de la figura 3.3, su método de sensado es el gravimétrico, por tal motivo se requieren pruebas de al menos 24 horas para garantizar una concentración considerable recolectada en el filtro para su posterior pesado. Este equipo cuenta con tecnología de vanguardia, ya que utiliza un PLC (Programmable Logic Controller) para controlar las distintas variables involucradas en el proceso de medición; tales como la humedad, temperatura del filtro y flujo de la bomba de aire, para así lograr obtener de una forma precisa la concentración de PM presente en el lugar de la medición.



Figura 7. TE-WILBUR. Nota. Tomado de: Tisch-Env (s.f.) Recuperado de: <https://tisch-env.com/low-volume-air-sampler/>

La gran ventaja de este equipo es que se encuentra dentro de la lista de equipos certificados por la U.S. EPA cumpliendo con los requisitos del CFR 40 Parte 53 Apéndice L, de esta manera resultaría interesante evaluar el desempeño de la estación ante un equipo de estas prestaciones.

Tabla 1.

Características TE-WILBUR

Sensor de temperatura ambiente	$\pm - 0,15^{\circ}\text{C}$, resolución 0.01°C
Rango de caudal	$\pm 0 - 25\text{LPM}$
Temperatura de operación	-25 a 50°C
Requisitos de alimentación	120[V] / 240[V]; potencia: 40[W]

3.2.2 DusTtrak II 8530(TSI). El DustTrak II Aerosol Monitor 8530 será implementado como un equipo guía, lo cual quiere decir, que será un patrón a comparar. Su principio de funcionamiento se basa en un fotómetro láser de dispersión de luz operado con batería y de registro de datos que le brinda lecturas de masa de PM en tiempo real. Utiliza un sistema de aire en la funda que aísla el PM en la cámara óptica para mantener las ópticas limpias y mejorar la confiabilidad y el bajo mantenimiento. Entre sus características destaca las concentraciones de PM que están disponibles a medir son las correspondientes a PM 1 , PM 2.5 y PM 10 ; la puesta a cero automática (con módulo cero opcional), realizar análisis gravimétrico en línea para calibraciones de referencia personalizadas, acondicionador de muestra de entrada calentado para reducir los efectos de la humedad, entre otros.



Figura 8. DusTrack 8530. Nota. Tomado de: TSI (s.f.) Recuperado de: <https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/dust-monitors/dusttrak-ii-aerosol-monitor-8530/>

Algunas de las características del Dusttrak son:

Tabla 2.

Características DusTtrak

Rango de medición	0.001 a 400 mg/m ³
Resolución	$\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Precisión de caudal	$\pm 5 \%$
Temperatura de operación	0 a 50°C
Coefficiente de temperatura	+0.001 mg/m ³ por°C

3.2.3 PMS 5003(Plantower). EL PMS1003 es un tipo de sensor de concentración de partículas digital y universal, que se puede utilizar para obtener el número de partículas suspendidas en el aire, es decir, la concentración de partículas, y darlas como interfaz digital. Su principio de funcionamiento óptico, implementa la dispersión láser, es decir, produce dispersión usando láser para irradiar partículas suspendidas en el aire, luego recoge luz dispersada en un cierto grado, y finalmente obtiene la curva de dispersión del cambio de luz con el tiempo. Al final, el diámetro de partícula equivalente y el número de partículas con diferentes diámetros por unidad de volumen pueden calcularse mediante el microprocesador (Yong, 2016) .



Figura 9. PMS-5003. Nota. Tomado de: <https://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/?fbclid=IwAR3AdG6mf58hJC5JLenyiELxmBVnlEKIx0WUYx2Nkpq1g0hQOhZPZX9-k-c>

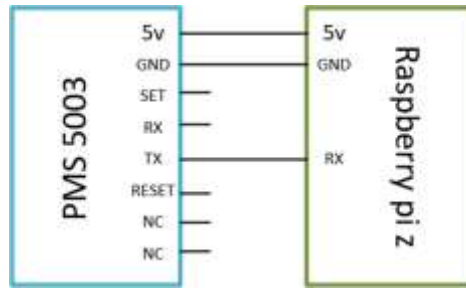


Figura 10. Conexión del PMS 5003

En la figura 9 se observa el sensor de material particulado PMS-5003 fabricado por plantower con comunicación UART. Las especificaciones son:

Tabla 3.

Características PMS 5003

Rango de medición	0.3 a 1.0 ; 1.0 a 2.5 2.5 a 10 μm
Rango efectivo (PM2.5 estándar)	0 a 500 $\mu g/m^3$
Rango máximo (PM2.5 estándar)	1000 $\mu g/m^3$
Error máximo de consistencia (PM2.5 estándar)	$\pm 10\%$ 100 a 500 $\mu g/m^3$
Temperatura de operación	-10 a +50 °C
Humedad relativa de operación	0 a 99 %

3.2.4 OPC-N2(Alphasense). Al igual que los contadores de partículas ópticas convencionales, el OPC-N2 mide la luz dispersada por partículas individuales transportadas en una corriente de aire de muestra a través de un rayo láser. Estas mediciones se usan para determinar el tamaño de partícula (relacionado con la intensidad de la luz dispersada a través de una calibración basada en la teoría de dispersión de Mie) y la concentración del número de partículas. Las cargas de masa de partículas PM 1 PM 2.5 o PM 10 se calculan a partir de los datos del espectro de partículas y la

concentración, suponiendo una densidad de partículas y un índice de refracción (Alphasense, abril 2015).



Figura 11: OPC-N2. Nota. Tomado de: <http://www.alphasense.com/index.php/products/optical-particle-counter/>

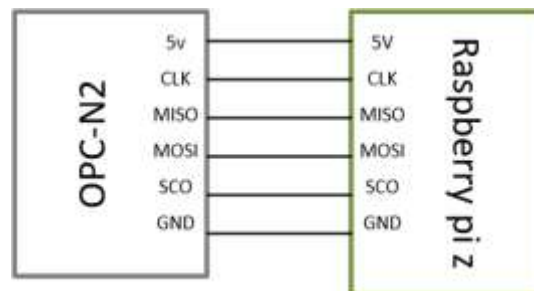


Figura 12. OPC-N2

En la figura 11 se observa el contador de partículas OPC-N2 fabricado por alphasense.

Sus características son:

Tabla 4.

Características OPC-N2

Rango de medición	0.38 a 17 μm
Máximo razón de conteo de partículas	10000 partículas por segundo
Error máximo de consistencia	$\pm 15 \%$
Probabilidad de coincidencia	0.84 % a 10^6 partículas por litro
Temperatura de operación	-20°C a 50 °C
Humedad relativa de operación	0 a 95 %

3.2.5 BME 280(Adafruit). En el mercado existen varios sensores de temperatura y humedad los cuales cada uno de ellos tienen características de precisión exactitud diferentes. Para el objetivo de este proyecto se buscó adquirir un sensor con las mejores prestaciones bajo los parámetros mencionados anteriormente. (KandRSmith.org, s.f.) realizó un estudio de varios sensores de temperatura y humedad los cuales son : DHT22, AM2302, AM2320, AM2321, SHT71, HTU21D, Si7021 y el BME280. y analizó su comportamiento bajo parámetros como histéresis, velocidad de respuesta, exactitud de temperatura y humedad, donde se encontró que el mejor sensor de los comparados fue el BMP/BME 280.

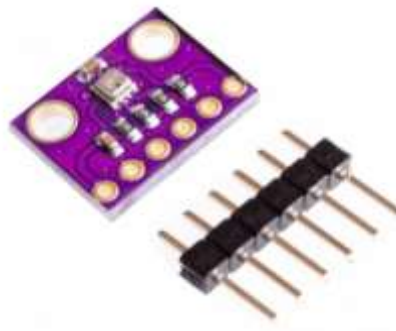


Figura 13. Modulo BME-280. Nota. Tomado de: <https://www.embeddedadventures.com/datasheets/BME280.pdf>

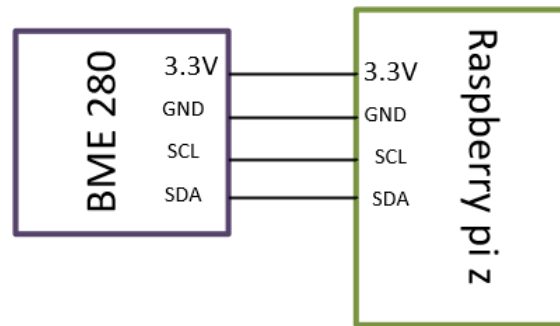


Figura 14. Diagrama de conexión del BME 280

Las especificaciones de este sensor son:

Tabla 5.

Características BME-280

Voltaje de alimentación	1.7V a 3.6V
Consumo de corriente hum y temp	1.8 $\mu A@1Hz$
Consumo de corriente pres y temp	2.8 $\mu A@1Hz$
Consumo de corriente hum pres y temp	2.8 $\mu A@1Hz$
Rango de operación	40 a +85°C, 0 a 100 % hum relativa, 300 a 1100 hPa

3.3 RTC (Sparkfun)

Debido a que la memoria de reloj de la raspberry es volátil, se llega a la necesidad de utilizar un reloj externo como el de la siguiente figura. Este modulo con protocolo de comunicación I2C, permite obtener de una forma precisa la fecha y hora, es de memoria no volátil gracias a que cuenta con una batería de 3[V], permitiendo garantizar un formato de fecha definido.



Figura 15. Modulo Real Time Clock (RTC). Nota. Tomado de: <https://www.riektron.co.za/product/3013>

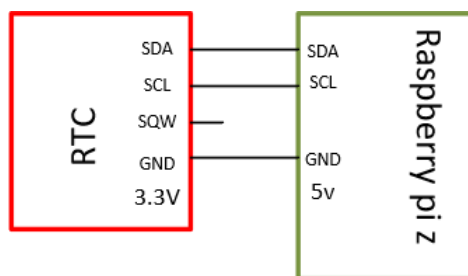


Figura 16. Diagrama de conexión del RTC

3.4 Pantalla NX3224T024 TFT LCD

Esta referencia de pantalla fabricada por *ITEAD Intelligent systems* de 2.4" cuenta con un área visual de 48,96 mm x 36,72 mm, una memoria RAM de 3,5 KB, una memoria FLASH de 4 MB, un puerto UART para la comunicación con el microcontrolador que se desee y por último cuenta con una ranura SD para su programación. Esta gran versatilidad de programación externa hace que las pantallas de la familia *NEXTION* tenga gran acogida en proyectos IOT. Su programación se realiza con el software *Nextion Editor* ofrecido de forma gratuita por el fabricante figura, permitiendo que el algoritmo que esté en ejecución en el microcontrolador no se vea afectado por posibles latencias producidas por control y visualización en la pantalla.

El control sobre esta pantalla se realiza haciendo uso de 3 de los 4 pines de entrada +5V,



Figura 17. Pantalla NX3224T024_011R - 2.4" TFT LCD TOUCH. Nota. Tomado de: NEXTION NX3224T024 - GENERIC 2.4"TFT INTELLIGENT LCD TOUCH DISPLAY. Disponible en: <https://www.itead.cc/nextion-nx3224t024.html>.

TX, RX, GND ya que tan solo es necesario realizar la escritura de la pantalla, garantizando así la lectura del PMS 5003. Con el objetivo de optimizar el consumo de la estación, pensando en una versión portátil (Alimentada por batería) es conveniente usar un interruptor de encendido, para manipular la pantalla solo cuando sea necesaria la confirmación del correcto funcionamiento de la estación en un lugar sin acceso a una red de internet.

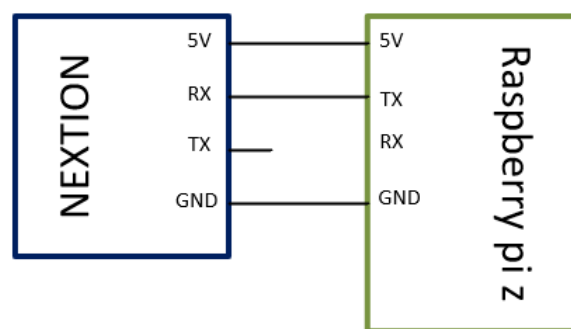


Figura 18 Diagrama de conexión de la pantalla NX3224T024

3.5 Algoritmos de adquisición, envío y recepción de datos

Para el desarrollo un prototipo final se debe tener en cuenta el tratamiento y procesamiento de datos provenientes de los sensores de bajo costo (PMS 5003, OPC-N2) y del sensor de humedad y temperatura BME 280; Para lograr generar modelos lineales óptimos que arrojen errores mínimos de predicción para poder cumplir el objetivo principal del proyecto.

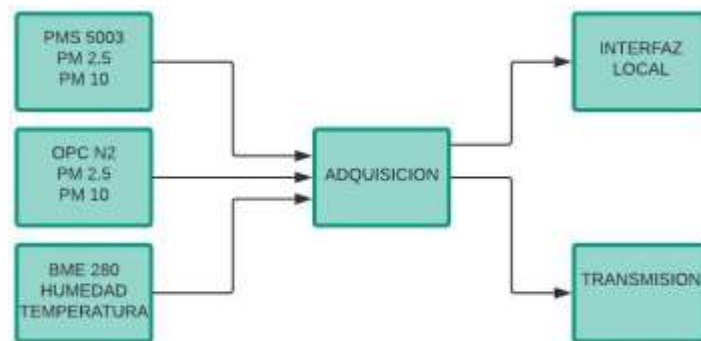


Figura 19. Nodo de adquisición de datos (NAD)

Como se detalla en la figura 3.15 la estructura del NAD se inicializa con la adquisición digital de los datos ofrecidos por los los equipos, posterior a esto se aplican los distintos modelos matemáticos que ajusten los valores de PM. Finalmente los datos ajustado y/o corregidos se envían a la interfaz local “pantalla” con la intención de mostrarlos al usuario que esté presente, y al mismo tiempo se envia via web a un servidor subido en la nube. y en caso de no existir conexion web, estos datos quedarán almacenados.

3.5.1 Adquisición de datos. El algoritmo de la estación se inicializa 40 segundos después de energizada, esto se realiza con la intención de encender los sensores con anterioridad para no arrojar datos erróneos. Al momento de iniciar el código, se inicializan las comunica- ciones con el

PMS 5003, OPC-N2 y BME280 y se crea un archivo con extensión (.csv) para guardar los datos adquiridos en una micro SD.

Recién tomado el primer dato de cada sensor, se aplican los modelos lineales encontrados, e inmediatamente en caso de contar con wifi se envían al servidor web. Sí por alguna razón la estación se des-energiza, al momento de energizarse ella inicia nuevamente el código, generando un nuevo archivo sin sobre escribir el existente. En la figura 3.16 se evidencia el proceso.

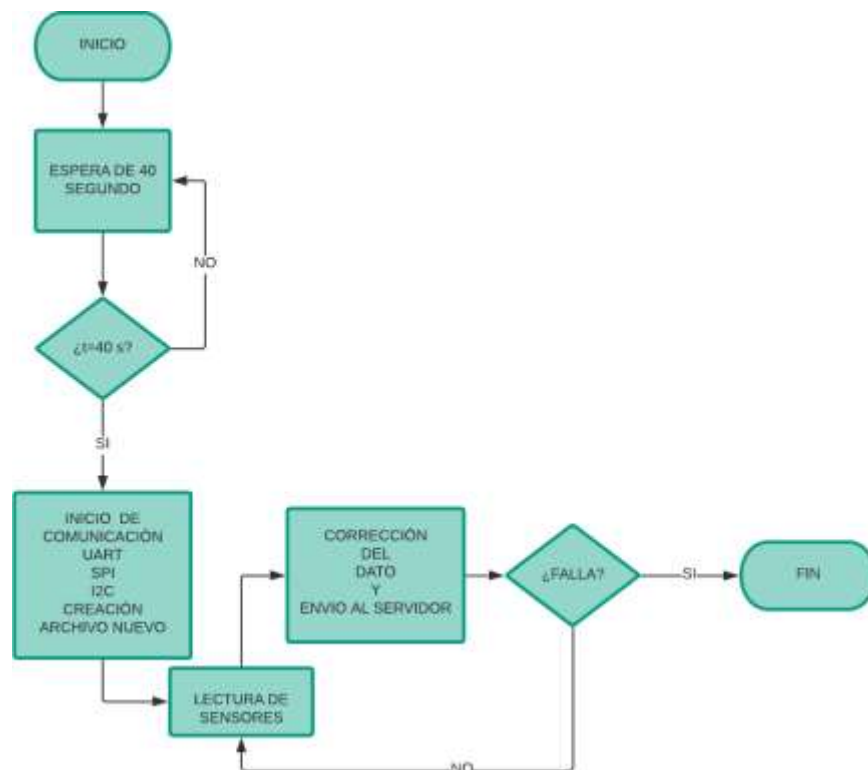


Figura 20. Diagrama de flujo de algoritmo de programación de la Raspberry pi

3.5.2 Transmisión y recepción. Debido al amplio crecimiento de las tecnologías y sus diversas aplicaciones, se llegó a a necesidad de interconectar múltiples sistemas inteligentes o con amplio flujo de información a una misma red de datos (internet). Con la intención de supervisar y/o manipular fácilmente su funcionamiento (*Requerimientos de una arquitectura IOT*, s.f.). Como es

de esperarse debido al flujo bidireccional de información (red-dispositivo, dispositivo-red); según desarrolladores de tecnología 5.0 como *chakray* el IOT cuenta con requerimientos básicos entre estos están:

1. **Conectividad y comunicación:** Se debe garantizar un manejo adecuado de los distintos protocolos de comunicación, ya que la información en general de una red IOT proviene de distintas maquinas con software y hardware definidos, y se debe garantizar que el usuario observe todo el sistema como si fuera uno.
2. **Gestión de dispositivos:** El objetivo principal del IOT es poder manipular y supervisar dispositivos computacionales remotamente. Es por esto que se presentan necesidades que se deben suplir como por ejemplo la actualización de software, localización de dispositivos perdidos, limpieza de información, actualización de sistemas de seguridad, entre otras.
3. **Recolección, análisis y actuación de los datos:** Una red de IOT debe estar diseñada con una arquitectura capaz de tomar decisiones pese a la cantidad de datos, relacionar variables, almacenar históricos y no siendo poco; el mismo dispositivo deberá tener la capacidad de analizar y reaccionar ante la información que recolecte.
4. **Escalabilidad:** La escalabilidad es una característica necesaria de cualquier red IOT. Ya que se debe garantizar un diseño de red que sea capaz de funcionar con un amplio numero de dispositivos sin saturar sus servidores web. Esta debe ser robusta a una posible modificación de elementos interconectados.

Teniendo claras las pautas a tener en cuenta en una red de IOT, se procedió a la realización de una pagina WEB con lenguajes de programación tales como HTML(EcuRed, 2012), CSS(McFarland, 2015), PHP(the php group, s.f.), JavaScript(mozilla y colaboradores individuales, 2018) y Python; y aprovechando el servidor web y el apoyo del grupo **Radiogis** se asig-

na un alojamiento de la página con la dirección **<http://35.243.199.245/particulado/index>** para la recepción en la nube (base de datos online).

En esta página se muestra a detalle las características de la estación, el comportamiento histórico de las variables ambientales y de concentración de PM.

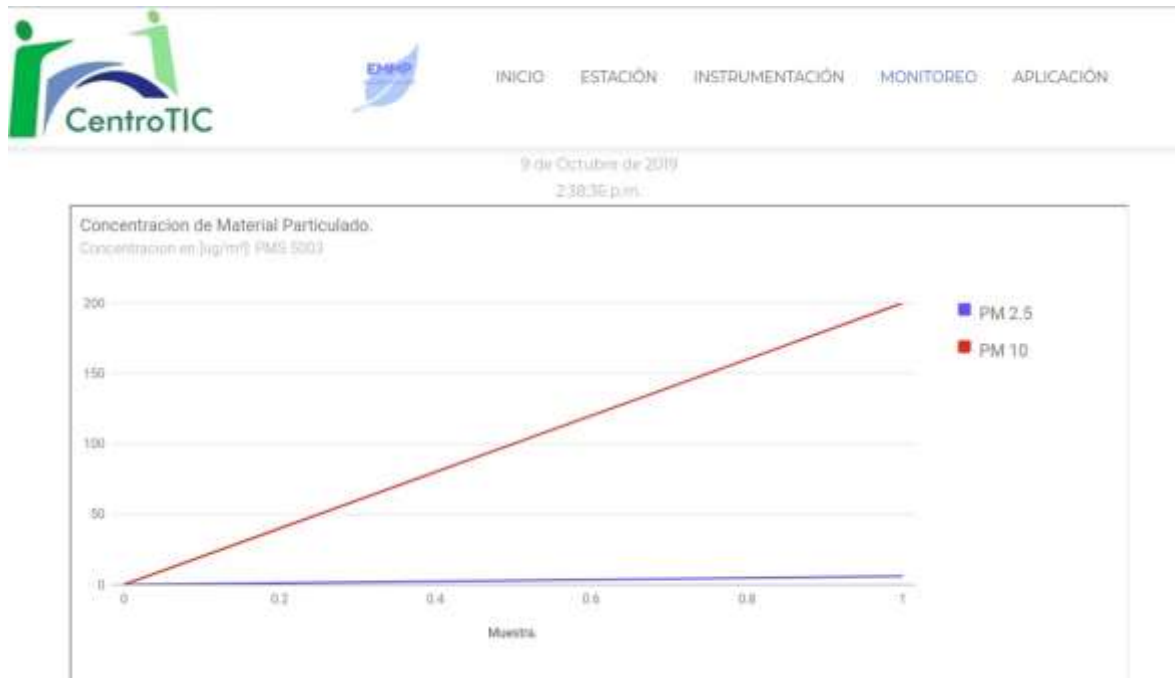


Figura 21. Página web

En la figura 21 se observa el modelo de gráfica que corresponde al sensor PMS 5003, estas interactúan en tiempo real si y solo si existe una red wifi conectada a la estación (raspberry pi). Si por alguna razón no hay servicio a internet, se suspende el envío de datos hasta cuando este se reanude, reanudando el envío a partir de la **muestra actual** y no de las anteriores (muestras pasadas no enviadas por la caída de la red), esto se debe a la flexibilidad con la que cuenta el servidor (transferencia de datos y ancho de banda).

Si se tuviese un servidor web con mayores prestaciones se podría realizar una mejora al prototipo; ya que así sería posible realizar el envío de los datos almacenados en la estación cada vez que se tenga acceso a internet, manteniendo un historial en la nube sin ninguna pausa temporal.

Sin embargo los datos quedarán almacenados en la memoria SD de la estación, siempre y cuando no se exceda la capacidad de almacenamiento de la misma, Permitiendo al usuario extraer los datos con el uso de una red de internet y la interfaz gráfica de VNC Server (procurar mantener una ip estática en la estación para facilitar el proceso de extracción de datos).

3.6 Circuito impreso

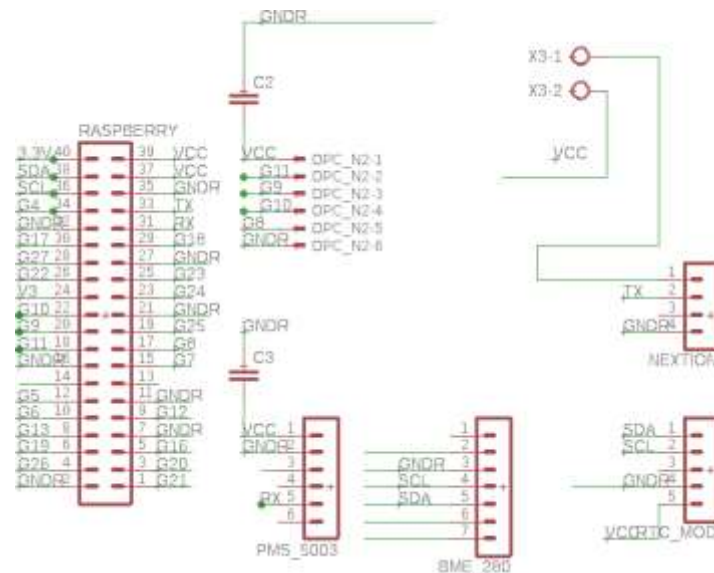


Figura 22. Esquemático de conexión de los sensores con la raspberry pi zero w

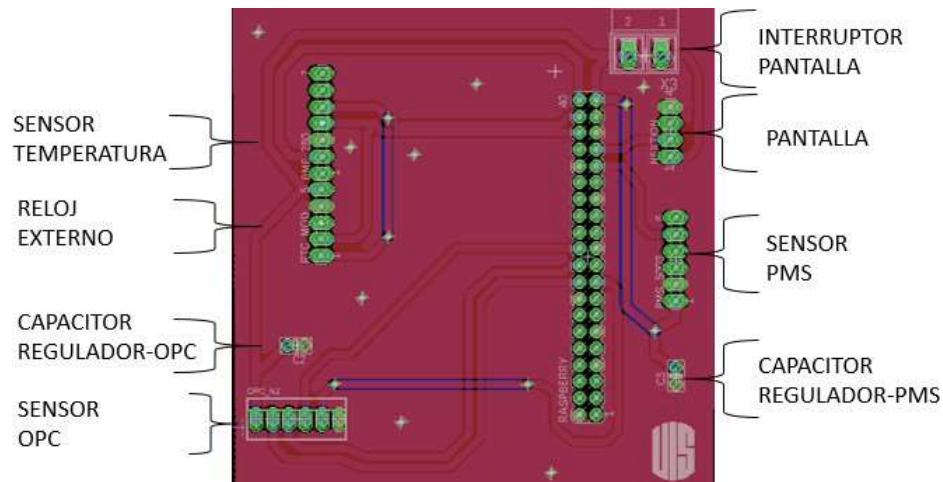


Figura 23. Distribución de elementos en circuito impreso

El circuito impreso de la figura 3.19 , cuenta con los elementos necesarios para alimentar lo sensores de PM (276 [mA]) directamente con el microcontrolador el cual consume (240 [mA]). Se complementa la regulación de la tensión con dos capacitores cerámicos para evitar ruido eléctrico de alta frecuencia que puedan afectar el funcionamiento de los sensores. Se tomó en cuenta que para evitar ruidos indeseados en las pistas de comunicación, no se realizaron cambio de plano y por ultimo se garantizó un plano de tierra amplio y una pista de VCC ancha, para nuevamente para evitar ruidos a alta frecuencia (INDUSTRIES, s.f.).

4. Pruebas y Toma de datos

Se tomaron varias pruebas en diferentes ubicaciones y bajo diferentes condiciones ambientales, con el fin de analizar el comportamiento de los sensores bajo concentraciones y variaciones diferentes de PM. Los sensores utilizados fueron el PMS 5003, el OPC-N2 y el DusTrak, el

algunas pruebas se contaba con la disposición de dos PMS 5003 o dos OPC-N2. A continuación se presentan las diferentes pruebas realizadas con un periodo de muestreo de 10 segundos, se presentarán las respectivas gráficas de concentración de PM a lo largo del tiempo y las gráficas de dispersión para su respectiva comparación.

4.2 Pruebas PM 2.5

4.2.1 Día sin carro. Esta prueba se realizó en un día sin carro en la carrera 33 con calle 52, en donde se quería obtener el perfil del ambiente ante la ausencia relativa de fuentes emisoras de PM 2.5. En esta prueba se dispuso de 4 sensores, los cuales fueron el DustTrak, PMS 5003 y 2 OPC-N2. La prueba se realizó alrededor de 3 horas con un total de 800 muestras. El perfil de los datos obtenido por cada sensor se puede observar en la figura 4.1

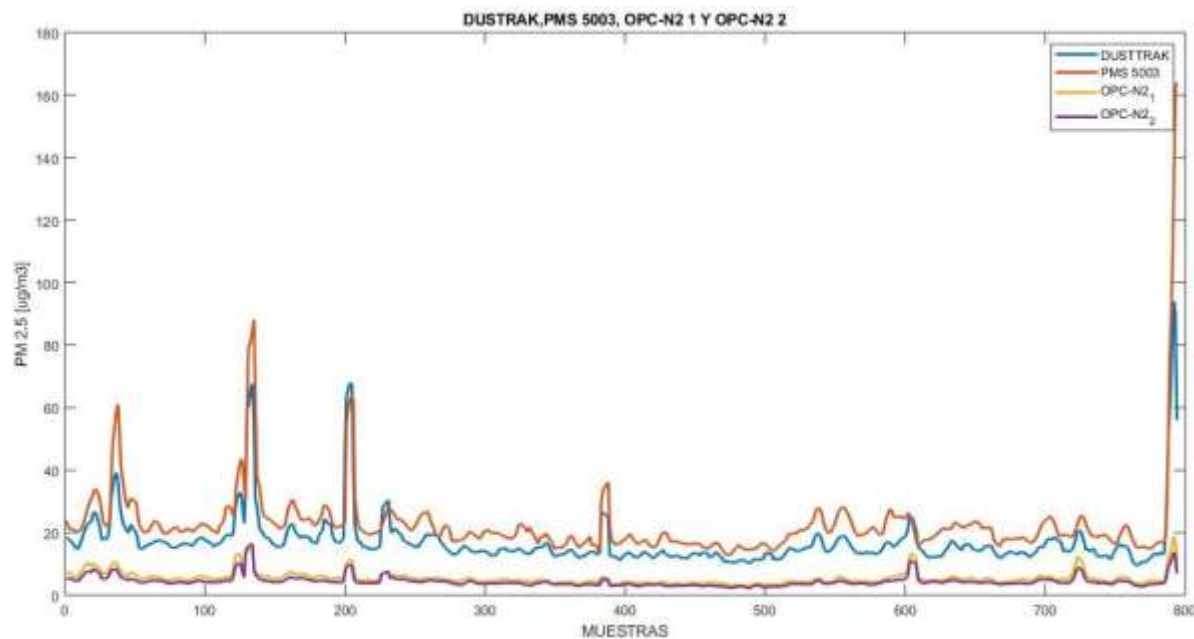


Figura 24. Concentración de PM 2.5 de prueba en día sin carro en la carrera 33 con calle 52 de Bucaramanga con promedio de 1 minuto

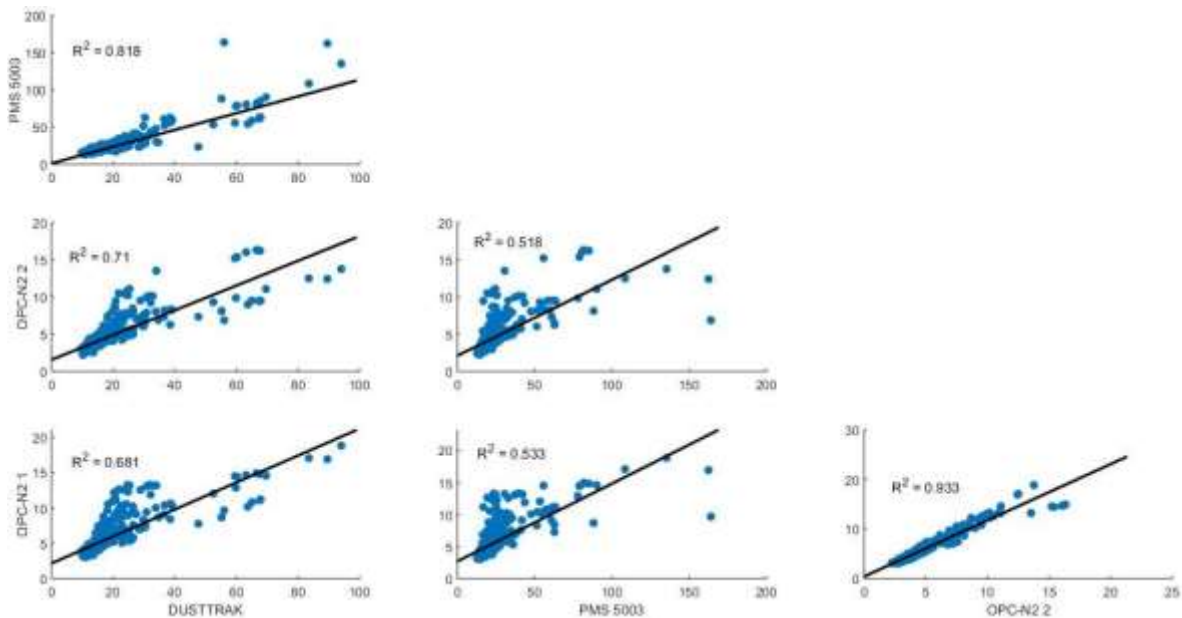


Figura 25. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 con promedio de 1 min de prueba carrera 33 con calle 52.

4.2.2 Jardín de las orquídeas UIS. Esta prueba se ejecutó en el jardín de las orquídeas de la Universidad Industrial de Santander, con la intención de observar el comportamiento de los sensores ante una alta emisión de PM 2.5. Se estimularon los sensores con diferentes emisiones provenientes de quema de carbón, cigarrillo e incienso, además contó con la emisión de humo de marihuana..

El humo de carbón mezclado con aire puro se introdujo por medio de una manguera en una caja de dimensiones 30x20x12 cm, debido al pequeño tamaño de la caja y al buen flujo de aire se asumió que la concentración de humo era homogénea dentro de toda la estructura de la caja. El humo de cigarrillo fue producido tras el consumo de una persona (exhalado por la persona) a una distancia prudente de los sensores (mínimo 1 metro de distancia). Por ultimo el incienso se encendió cerca a los sensores hasta que se consumieran. El perfil se observa en la figura 4.3:

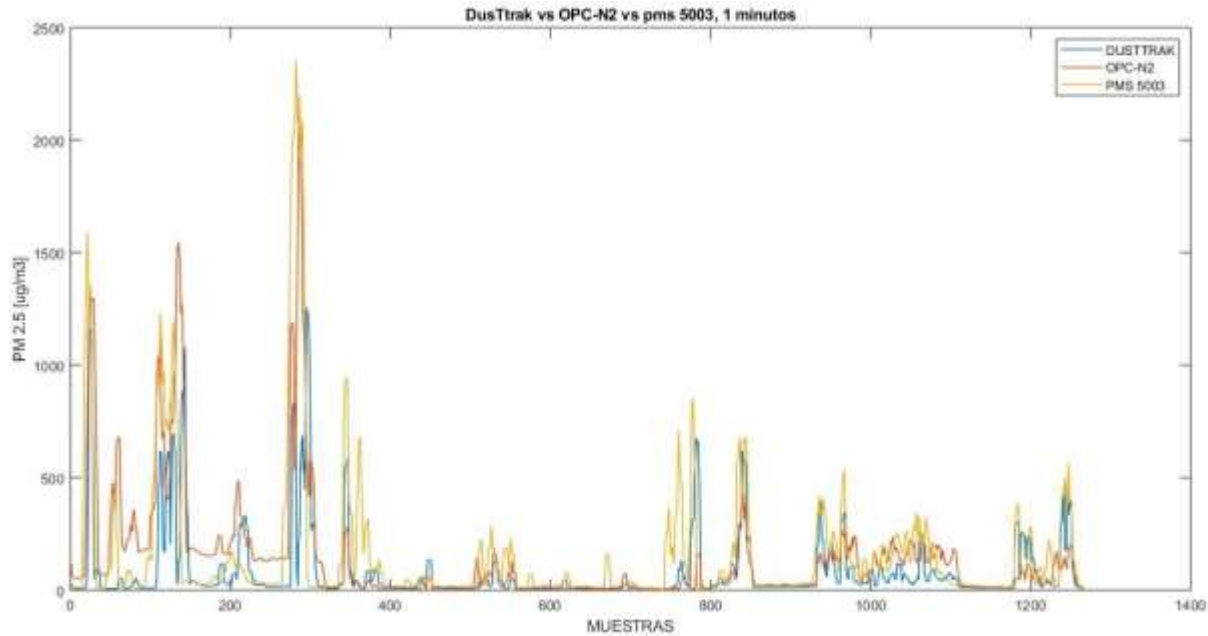


Figura 26. Concentración de PM 2.5 de prueba en el jardín de las orquídeas UIS frente a emisiones de carbón, cigarrillo e incienso con promedio de 1 minuto.

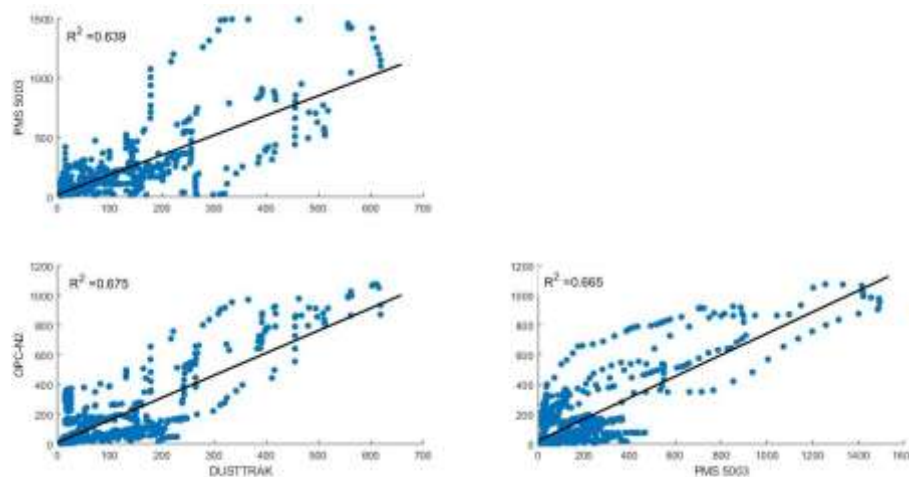


Figura 27. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 con promedio de 5 min.

4.2.3 Vía Girón. Esta prueba se realizó en la vía Girón a 1 [Km] de la zona industrial, en donde se perciben todas las emisiones de PM 2.5 de fábricas de alimentos como aceites e incluso una

planta de refinería de combustible adjudicada a la empresa terpel. Por otro lado se percibe gran concentración de polvo y hollín generado por el alto tráfico de vehículos pesados. La gráfica de concentración de PM se observa en la figura 4.5:

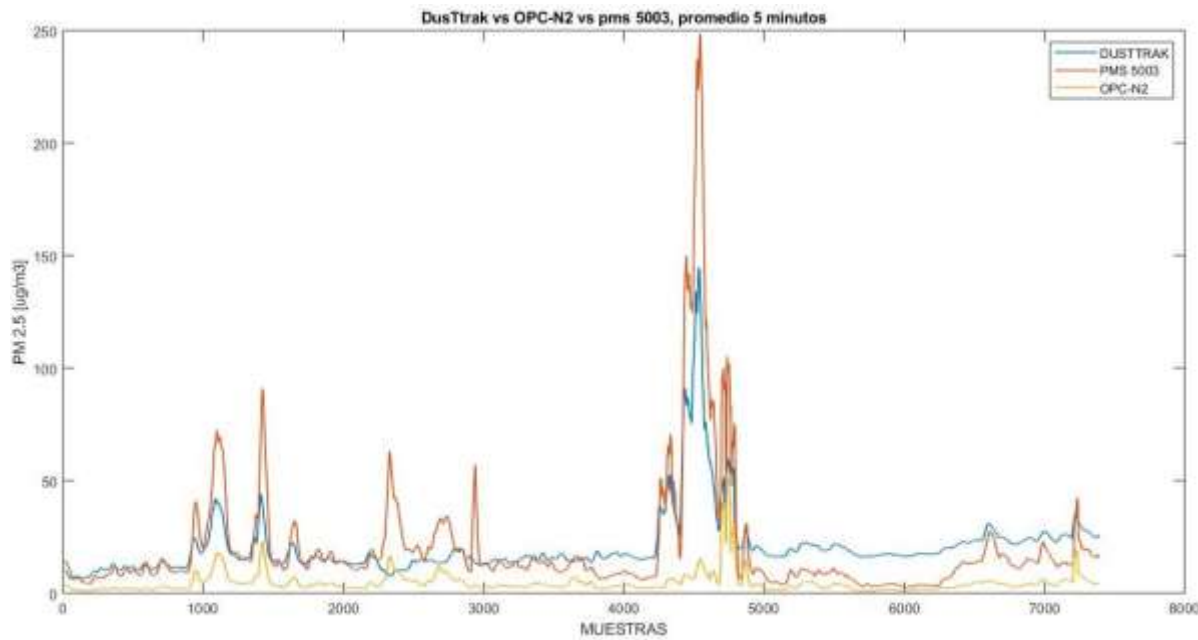


Figura 28. Concentración de PM 2.5 de prueba vía Girón con promedio de 5 minutos.

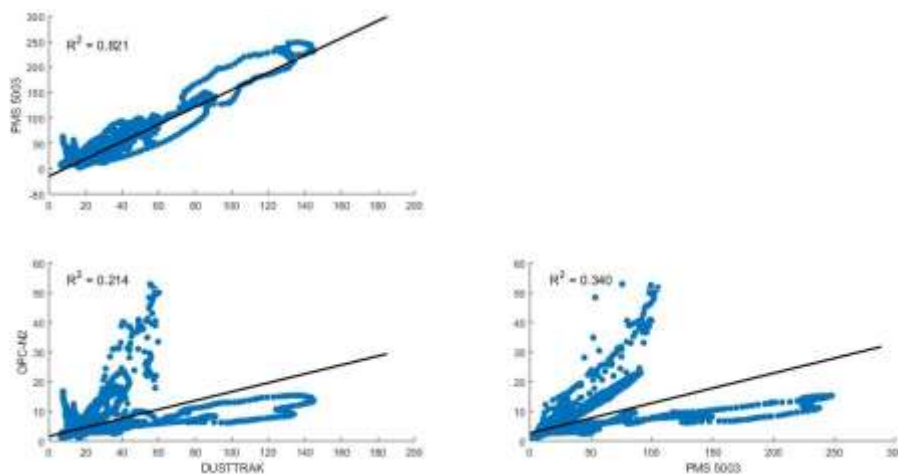


Figura 29. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 con promedio de 5 minutos de prueba en vía Girón.

4.2.4 Halley. La prueba se realizó en la terraza del edificio de Ciencias Humanas de la universidad industrial de Santander, al lado del observatorio con la autorización del grupo Halley. La prueba tuvo una duración de 24 horas con la disposición de un OPC-N2 y un PMS 5003, en este caso no se contó con el Dusttrak.

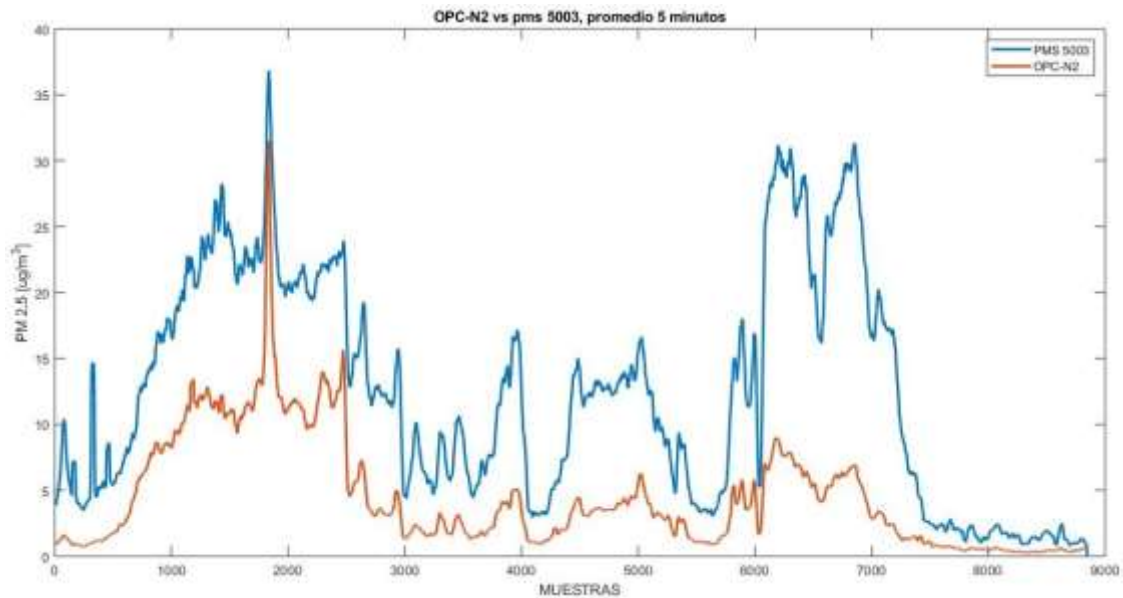


Figura 30. Concentración de PM 2.5 de prueba grupo Halley.

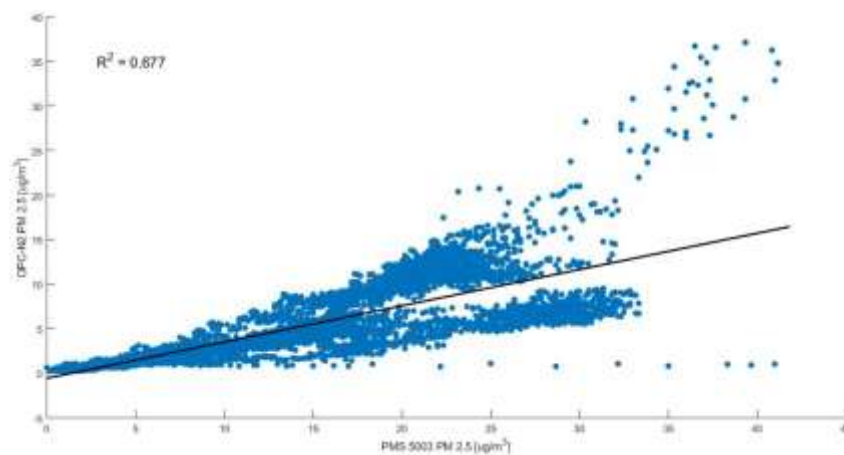


Figura 31. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 2.5 de prueba en grupo Halley.

4.3 Pruebas PM 10

4.3.1 Día sin carro. Se realizó igualmente un muestreo de PM 10 el día sin carro, esta prueba se realizó alrededor de 1 hora debido a que estaba finalizando el día. En la figura 4.9 se observa el perfil de PM muestreado por los sensores.

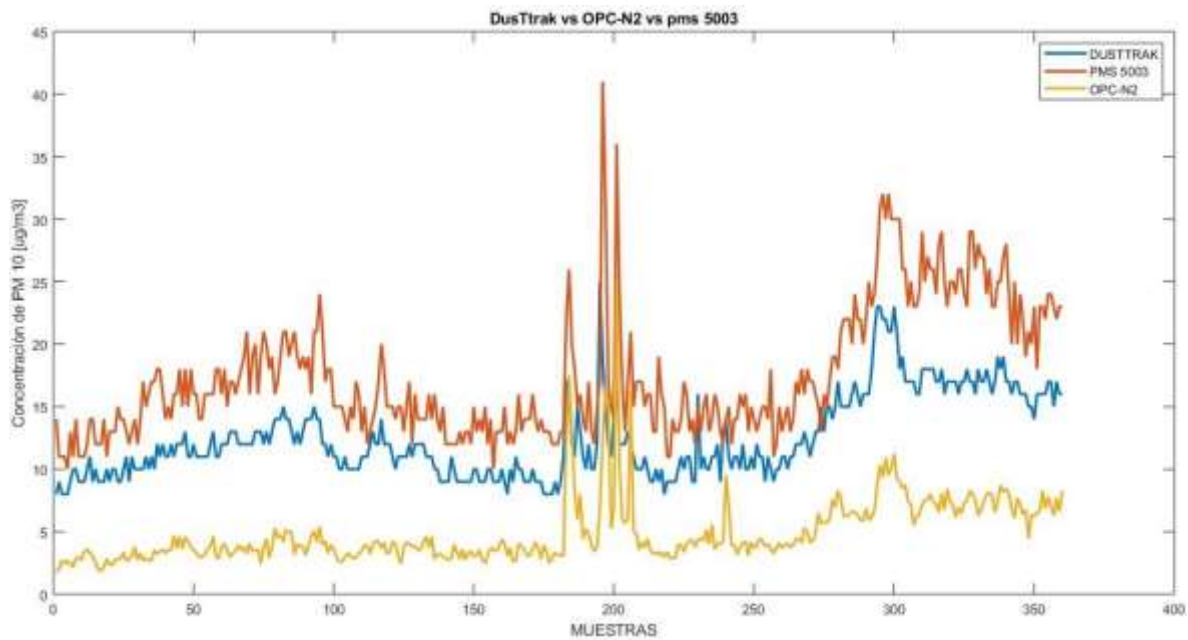


Figura 32. Concentración de PM 10 de prueba día sin carro en la carrera 33 con calle 52 de Bucaramanga.

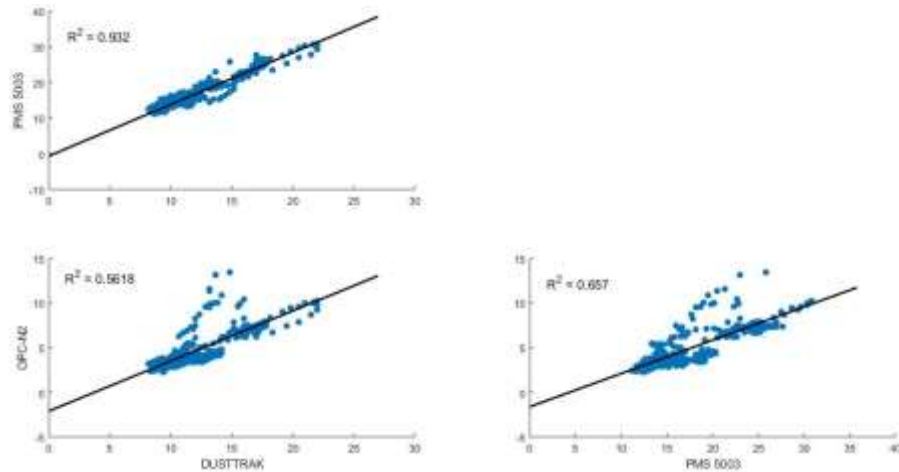


Figura 33. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de PM 10 de prueba día sin carro en la carrera 33 con calle 52 de bucaramanga.

4.3.1.1 Prueba construcción UIS carrera 30. Esta prueba se realiza aprovechando el cortado de piedra caliza utilizada en la fachada de un edificio que se esta construyendo en las instalaciones de la universidad, para observar el desempeño de los sensores ante una alta emisión de polvo.

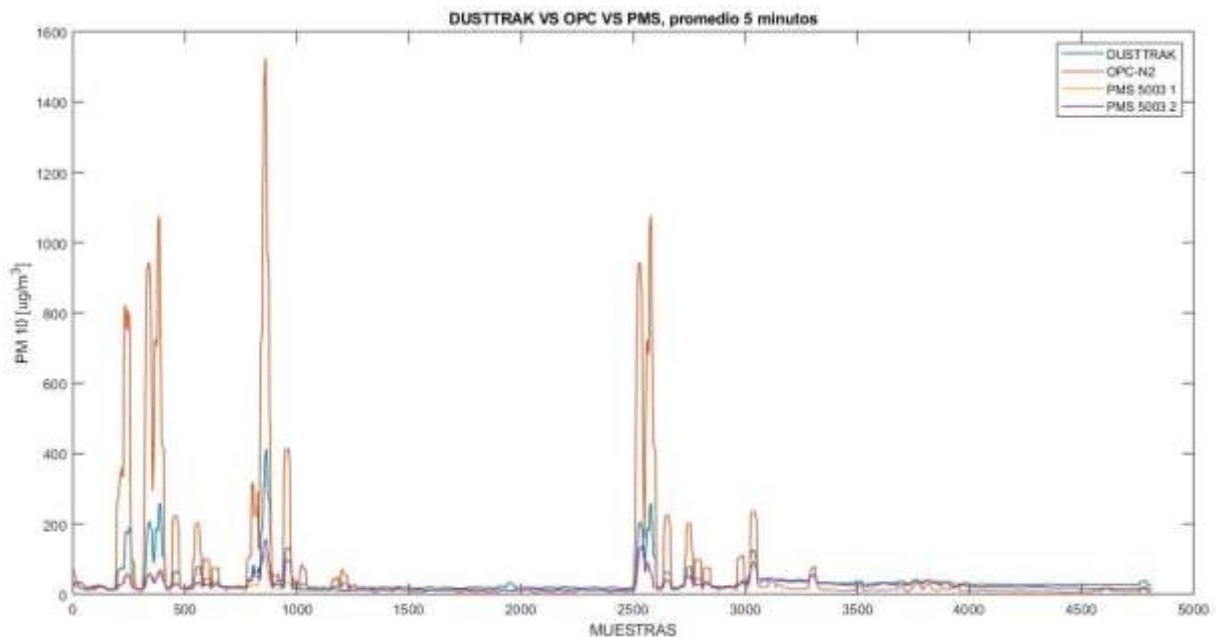


Figura 34. Datos de prueba de corta duración PM10 de prueba construcción UIS carrera 30.

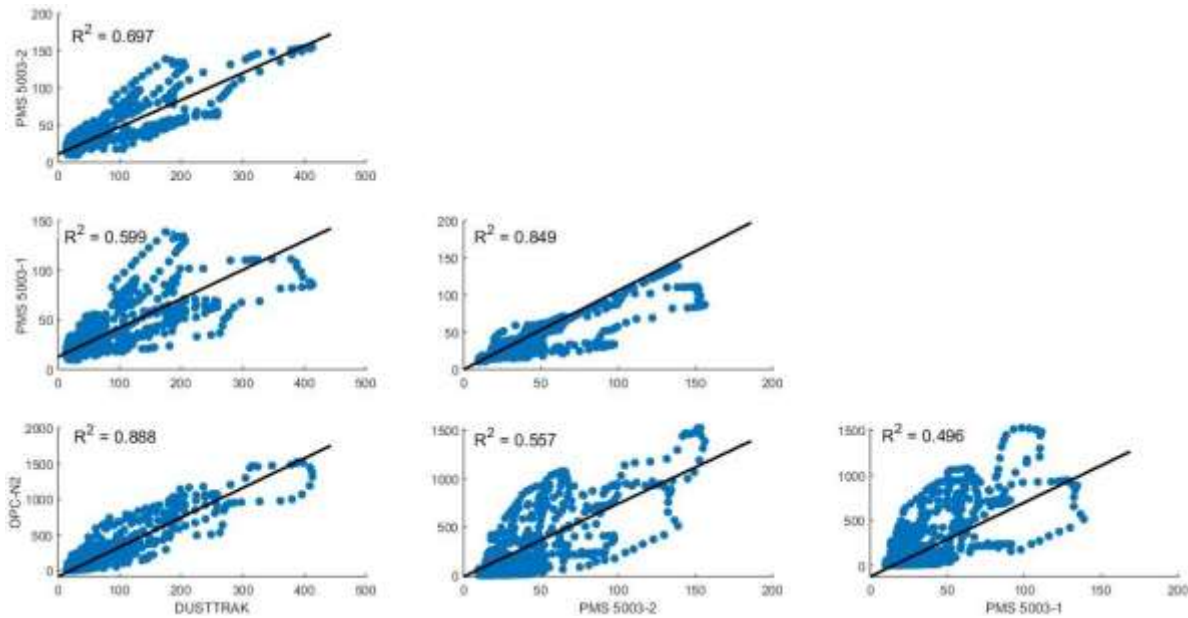


Figura 35. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 10 con promedio móvil de 5 min de prueba construcción UIS carrera 30.

4.3.2 Vía Girón. Esta prueba es la misma descrita en la sección de Girón PM 2.5 sin embargo se realizó midiendo concentraciones de PM 10. Los resultados de las mediciones son las siguientes:

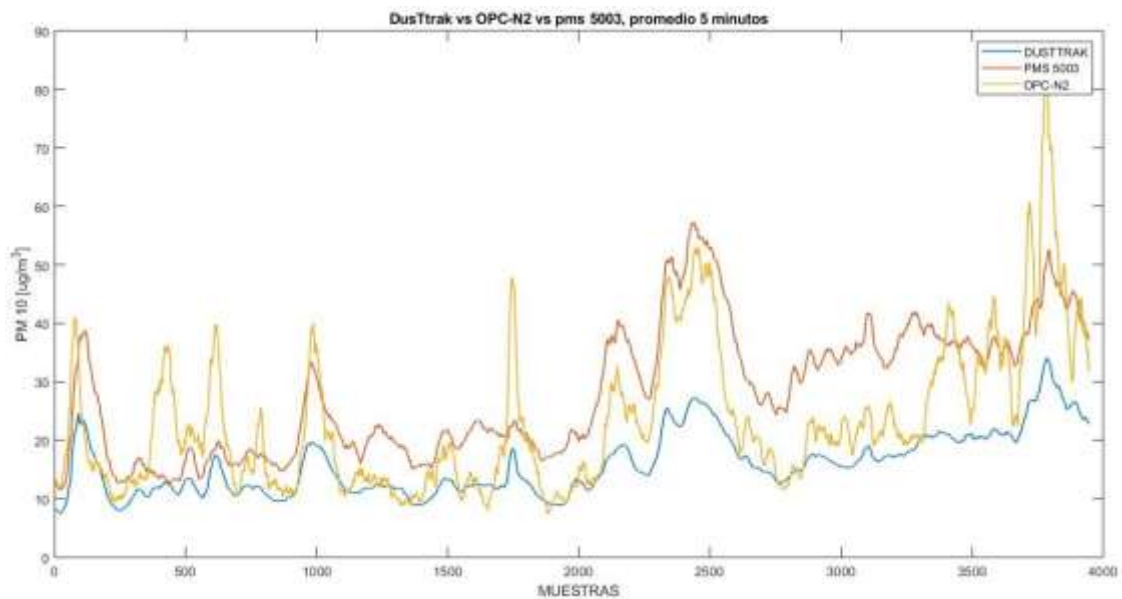


Figura 36. Concentración de PM 10 de prueba en vía Girón, con promedio de 5 minutos

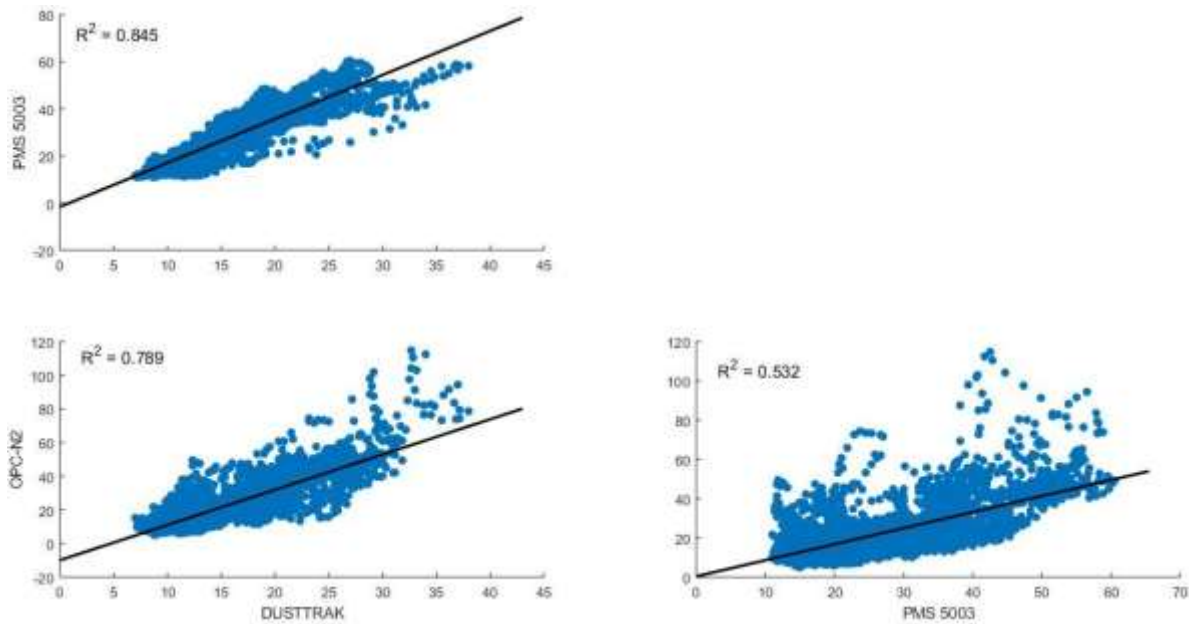


Figura 37. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 10 [ug/m3] con promedio móvil de 5 min de prueba construcción UIS carrera 30.

4.3.3 Halley. Al igual que la prueba de Halley (PM 2.5) esta se realizo en la terraza del edificio de ciencias humanas al lado del domo, con el permiso del grupo Halley, Esta prueba se realizo por 24 horas en las que los sensores quedaron en la intemperie, donde se encontraban cerca de la construcción del nuevo edificio de la UIS, el cual era una fuente significativa de PM 10.

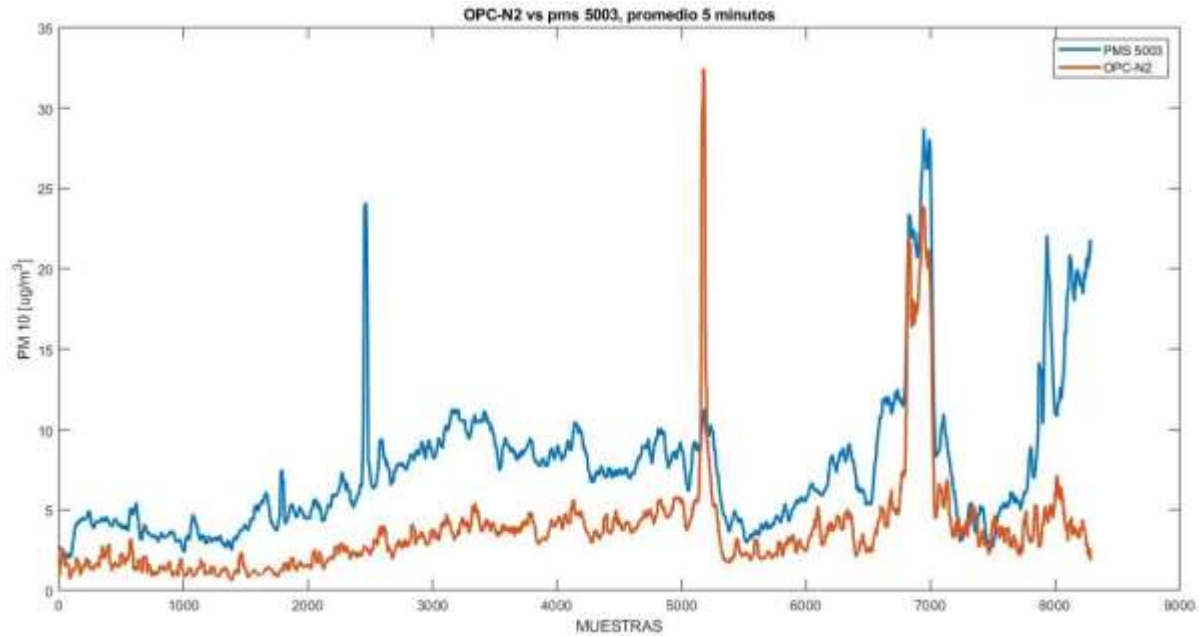


Figura 38. Concentración de PM 10 con promedio móvil de 5 minutos de prueba terraza de edificio de ciencias humana UIS.

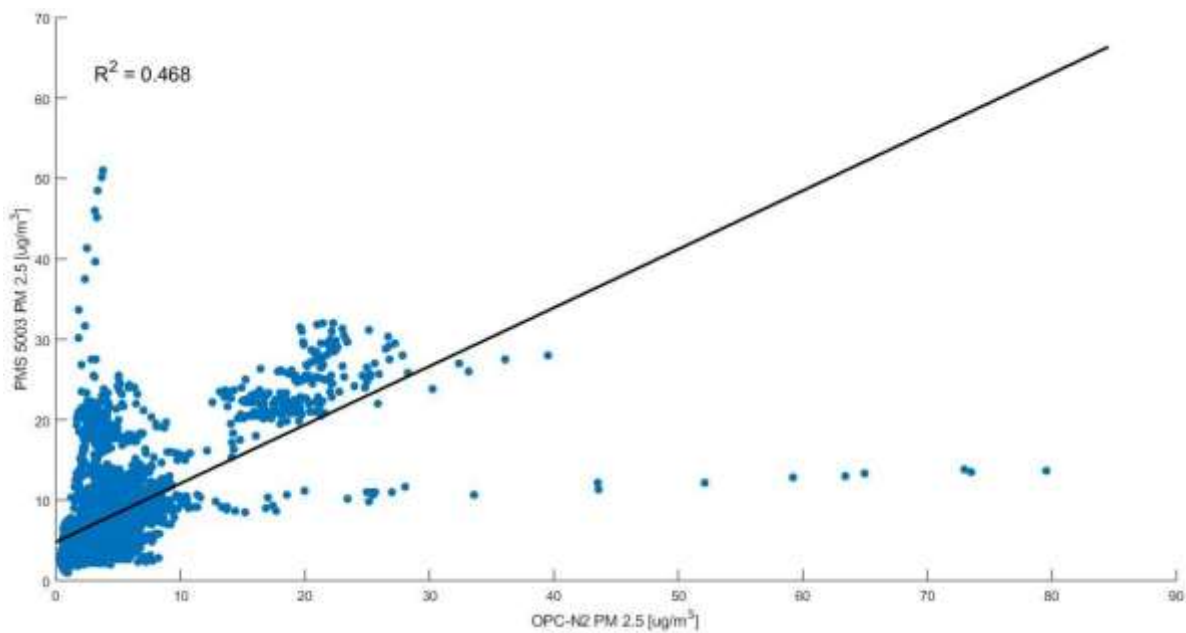


Figura 39. Gráficas de dispersión y coeficientes de determinación de concentración de PM 10 con promedio móvil de 5 min, prueba terraza del edificio de Ciencias Humanas UIS.

4.4 Pruebas de humedad y temperatura OPC-N2 y PMS 5003

Estas pruebas se realizaron para intentar correlacionar los dos sensores de PM de la estación y lograr observar los efectos de la humedad y temperatura en la calidad de los datos. Se mostrarán dos pruebas representativas de corta y larga duración, mostrando que estos sensores se ven afectados cuando la humedad presenta variaciones lentas y repentinas.

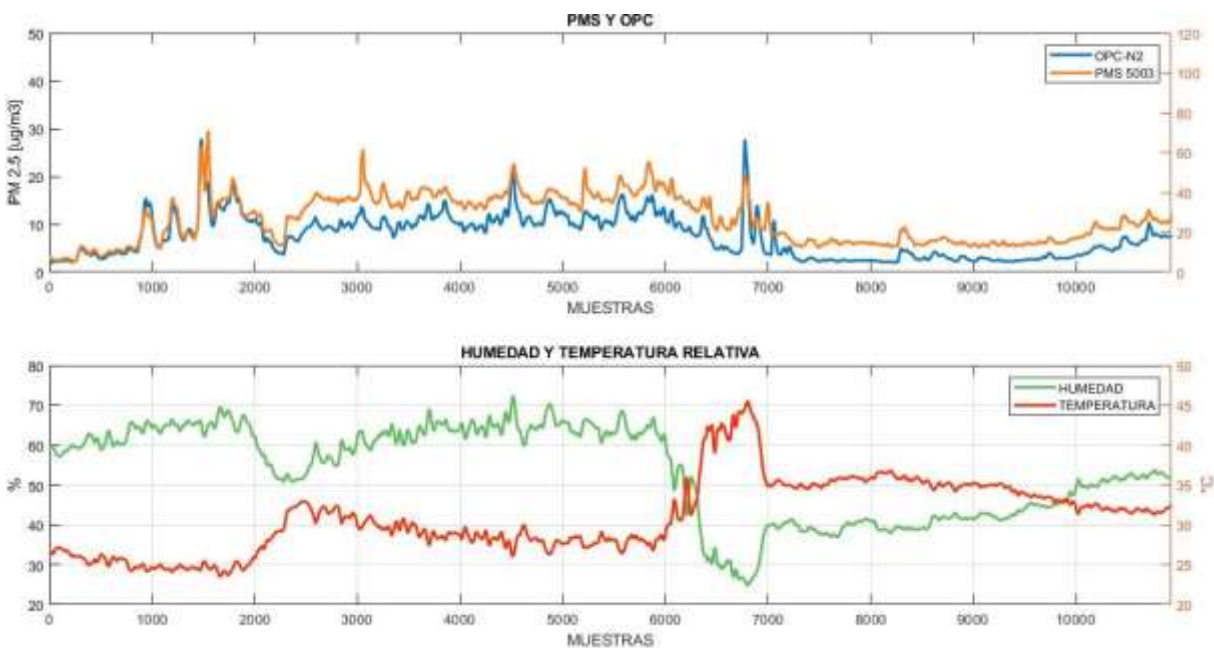


Figura 40. Concentración de PM 2.5 de prueba de 24 horas en aire libre.

4.4.1 PM 10 (Aire acondicionado)

4.4.1.1 Con perturbación. En la figura 4.18 se aprecia la primera parte una prueba que se realizó dentro de un recinto cerrado en presencia de aire acondicionado. Durante la prueba se realizaron perturbaciones de PM10 (polvo) de una forma pausada, para así lograr estimar el tiempo de reacción de ambos sensores (escala izquierda OPC-N2 y escala derecha PMS 5003), cuando la

humedad y temperatura eran variables. Como se evidencia en la gráfica correspondiente a la humedad relativa (escala izquierda); en principio decae y consecutivamente crece hasta alcanzar un valor de 67.54 %. Y la temperatura (escala derecha) mantiene un valor aproximado a 26°C y decae consecutivamente a un valor de 21°C

Se logra reconocer un perfil muy similar entre el OPC-N2 y el PMS 5003, pero con una variación significativa en el orden de la escala y el tiempo de respuesta, ya que el PMS5003 responde una muestra atrasada (10 segundos), respecto al OPC N2. sin embargo ambos responden bastante bien a los estímulos realizados.

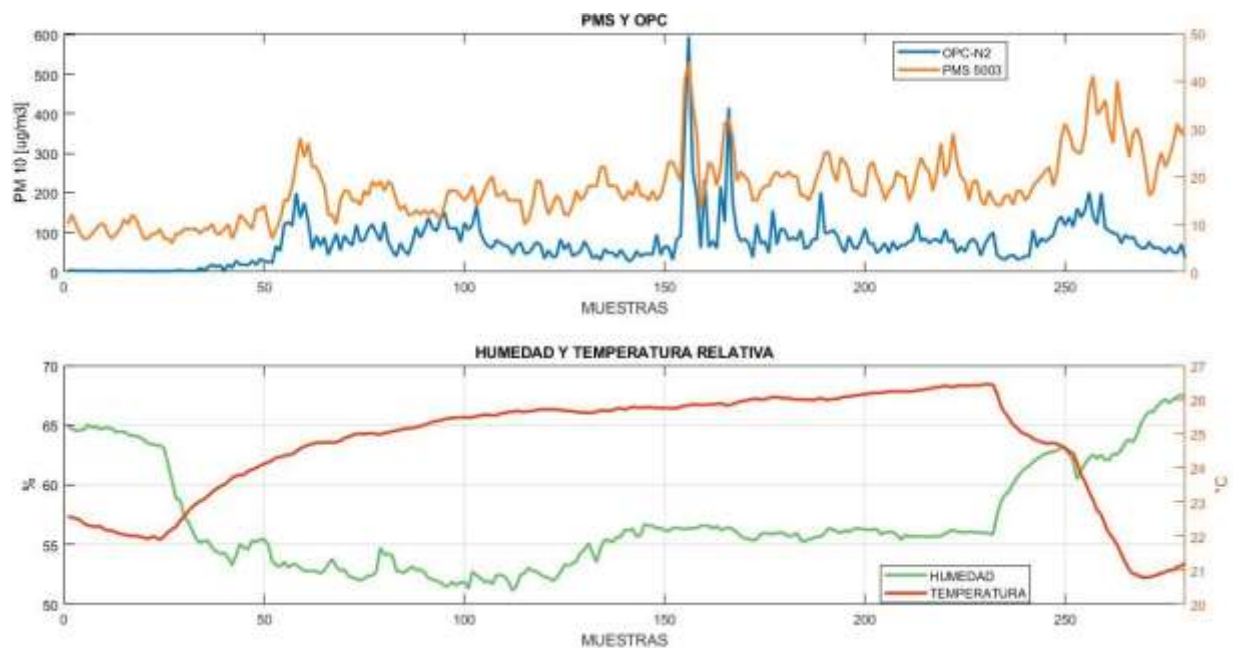


Figura 41. Concentración de PM 10 de prueba con perturbación(parte 1) en aire acondicionado

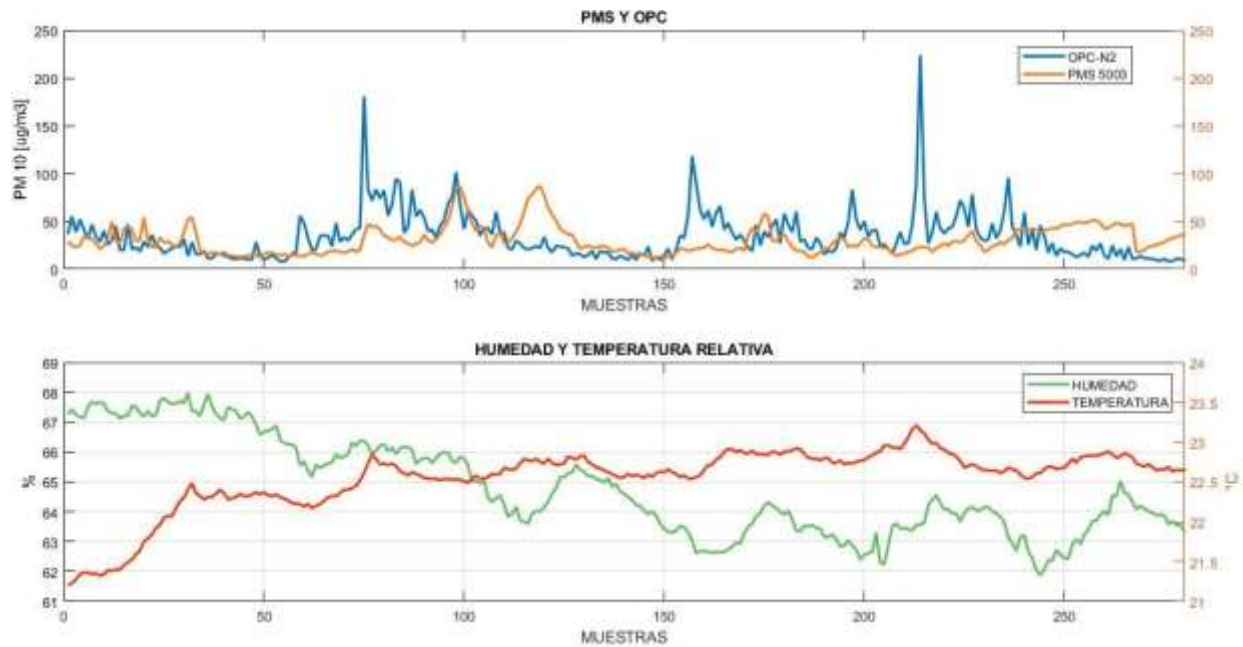


Figura 42. Concentración de PM 10 de prueba con perturbación(parte 2) en aire acondicionado.

4.4.1.2 Sin perturbación. En la figura 4.20 se observan los datos arrojados por la estación en un ambiente con humedad y temperatura relativa variables, pero sin producir perturbaciones de PM 10.

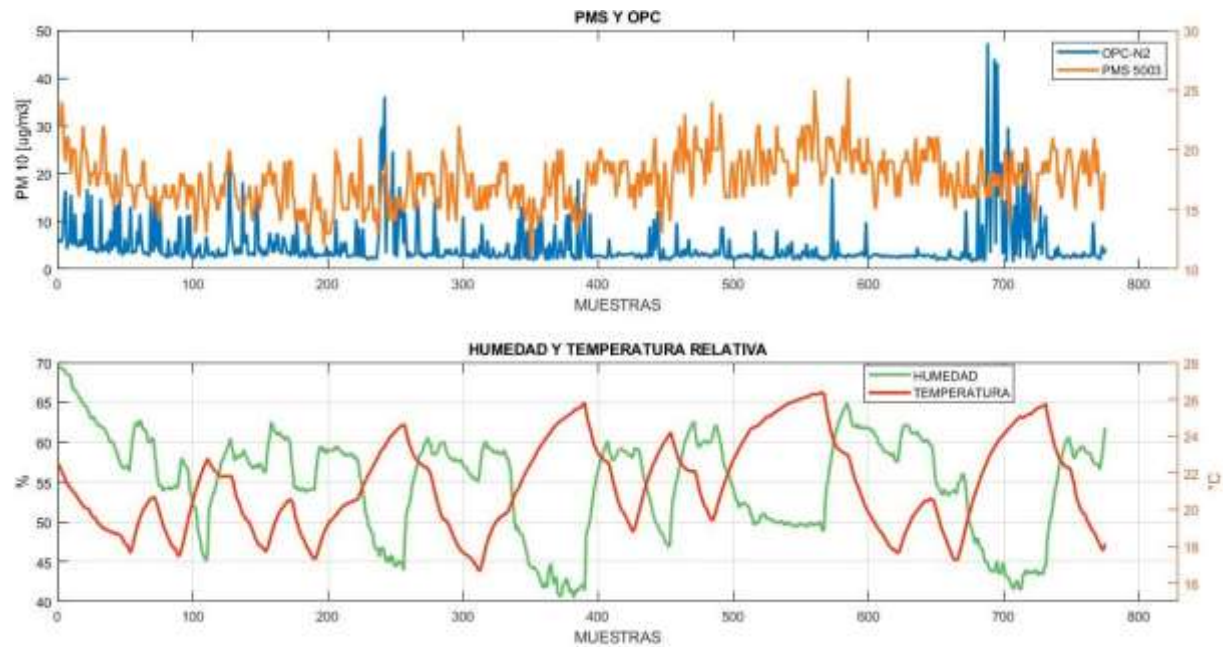


Figura 43. Concentración de PM 10 de prueba sin perturbación en aire acondicionado.

5. Resultados, ajustes y analisis

5.1. PM 2.5

Resultados de las pruebas realizadas de PM 2.5, se marca con negrilla el instrumento de referencia, las lecturas de PM están de la siguiente manera: promedio $\pm$ desviación estándar (min-max)

Tabla 6.

Resultados de las pruebas realizadas de PM 2.5

localización	instrumento	PM 2.5	R ²	RH %	Temp °C
carrera 33 con calle 52 N = 800	OPC-N2 1	5.4 ±2,7 (2.5-42.2)	0.681	---	---
	OPC-N2 2	4.42 ±2,7 (1.7-54.08)	0.710	---	---
	PMS 5003	22.45 ±14,65 (1-209)	0.818	---	---
	DusTtrak	17.01 ±12,42 (8-197)	---	---	---
Jardin de las orquideas UIS N = 1267	OPC-N2	142.33 ±316 (1.26-3676)	0.665	---	---
	PMS 5003	165.69 ±382 (5-2284)	0.639	---	---
	DusTtrak	87.78 ±298 (3-2940)	---	---	---
	BMP 280	---	---	10.51 - 53.71	29.63 - 64.41
Vía Girón N =7385	OPC-N2	4.697 ±9,154 (0.43-422.94)	0.340	---	---
	PMS 5003	20.594 ±33,43 (1-749)	0.821	---	---
	DusTtrak	20.782 ±16,519 (0-231)	---	---	---
	BMP 280	---	---	45.39 - 71.08	25.74 - 33.49

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de PM 10.

Tabla 7.

Resultados de las pruebas de PM 10.

localización	instrumento	PM 10	R ²	RH %	Temp °C
Carrera 33 con calle 52 N = 800	OPC-N2	4.8 ±2,5 (1.74-25.09)	0.651	---	---
	PMS 5003	17.45 ±5,14 (10-41)	0.923	---	---
	DusTtrak	12.46 ±3,28 (8-25)	---	---	---
Construcción UIS N = 4811	OPC-N2	71.28 ±323 (1.05-6133.45)	0.888	---	---
	PMS 5003 1	23.70 ±25 (8-398)	0.599	---	---
	PMS 5003 2	24.55 ±25 (8-407)	0.697	---	---
	DusTtrak	37.22 ±0 (12-1350.15)	---	---	---
	BMP 280	---	---	27.62 - 57.38	25.55 - 39.55
Vía Girón N = 3975	OPC-N2 1	23.471 ±16,37 (3.67-142.3)	0.789	---	---
	PMS 5003	28.160 ±11,496 (9-63)	0.845	---	---
	DusTtrak	14.948 ±5,613 (16-43)	---	---	---
	BMP 280	---	---	52.63 - 67.73	25.58 - 31.45

5.2 Ajuste de las concentraciones de PM usando el método de R^2

Haciendo uso de los modelos lineales encontrados en el transcurso del análisis de los datos, se tienen en cuantas los modelos con los máximos R^2 para realizar un ajuste a los datos adquiridos por los sensores tal como lo propone (EPA, s.f.). El procedimiento realizado para el ajuste es el siguiente.

Se busca cual fue el modelo con el R^2 mas alto de las pruebas realizadas, se encuentra la ecuación de la recta descrito por la regresión lineal, la cual tiene la siguiente forma:

$$\text{sensor} = m * \text{referencia} + b$$

donde m es la pendiente y b es la intersección de la recta, tomadas del modelo de la regresión lineal.

$$\text{ajuste_de_concentracion_del_sensor} = \frac{\text{concentracion medida por el sensor} - b}{m}$$

Esto se realiza para cada sensor que se evalúa. Teniendo en cuenta que entre mas bajo sea el valor de R^2 menos útil será el ajuste, es por esto que se tienen en cuenta los mayores R^2 de las pruebas realizadas.

5.2.1 Ajustes de pruebas PM 2.5. Según los datos observados en la tabla de resultados para las pruebas de PM 2.5, el mejor R^2 fue el de la prueba de vía Girón, con un valor de 0.821 para el PMS-5003. Y un valor de 0.72 para el OPC-N2 En la prueba del jardín de las orquídeas UIS. Las ecuaciones usadas para el ajuste son las siguientes:

$$PMS = 1,699 * \text{referencia} - 14,71$$

$$OPC = 0,1504 * \text{referencia} + 1,571$$

A continuación se observarán los ajustes de las concentraciones de PM 2.5 a las pruebas realizadas.

5.2.2 Carrera 33 con calle 52. Ajuste de los datos realizados el día sin carro con la ecuación de ajuste.

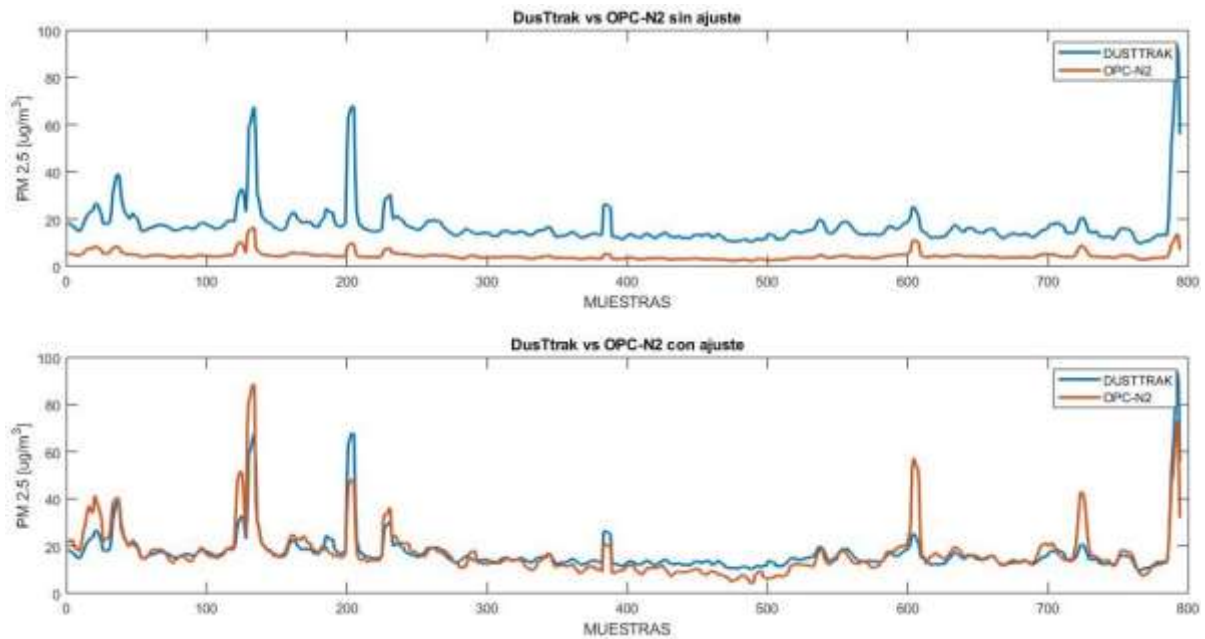


Figura 44. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-N2) de prueba carrera 33 con calle 52.

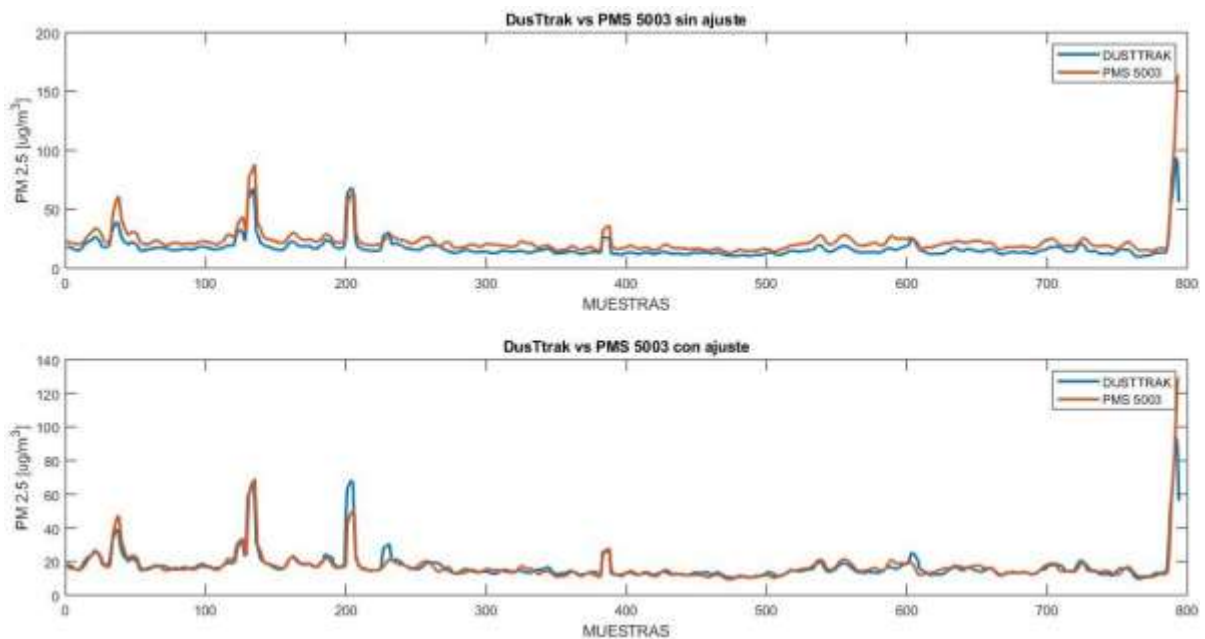


Figura 45. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS 50003) de prueba carrera 33 con calle 52.

5.2.3 Jardín de las orquídeas UIS. Ajuste de los datos realizados el jardín de las orquídeas con la ecuación de ajuste.

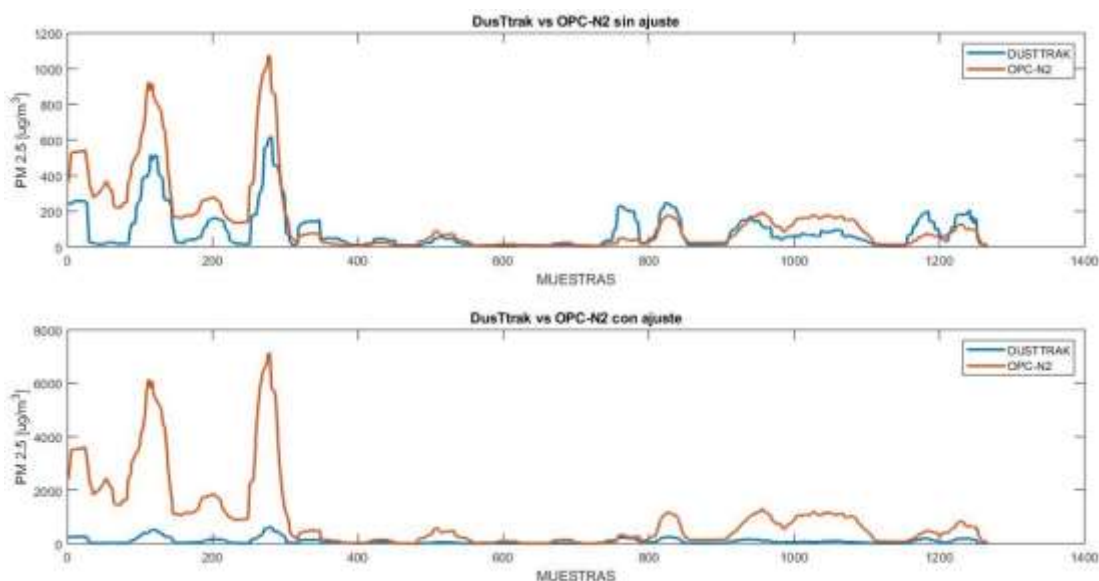


Figura 46. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-N2) de prueba en jardín de las orquídeas.

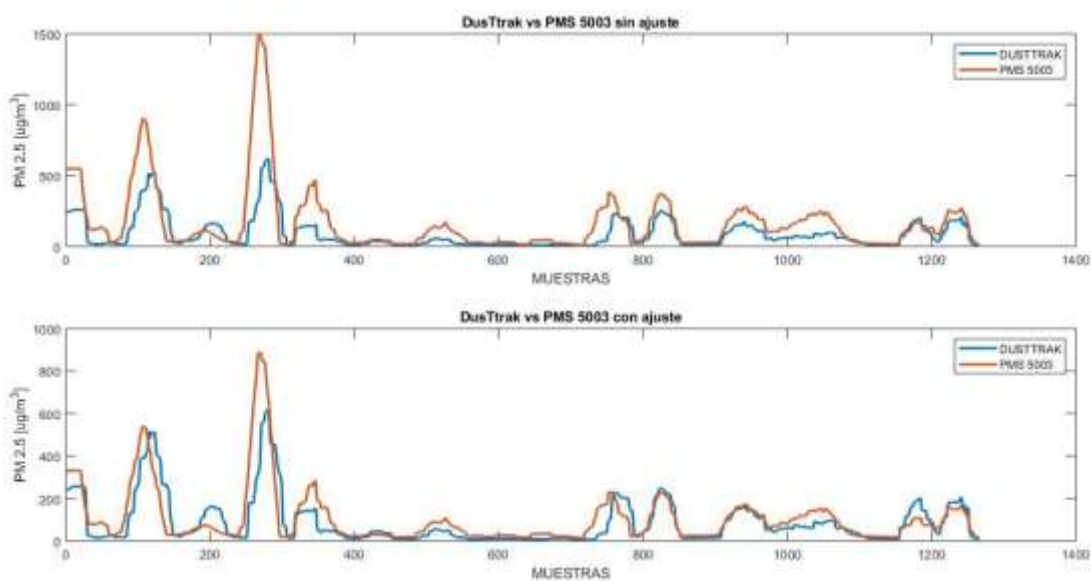


Figura 47. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS 5003) de prueba en jardín de las orquídeas.

5.2.4 Vía Giron. Ajuste de los datos tonados en la vía Giron con la ecuación de ajuste.

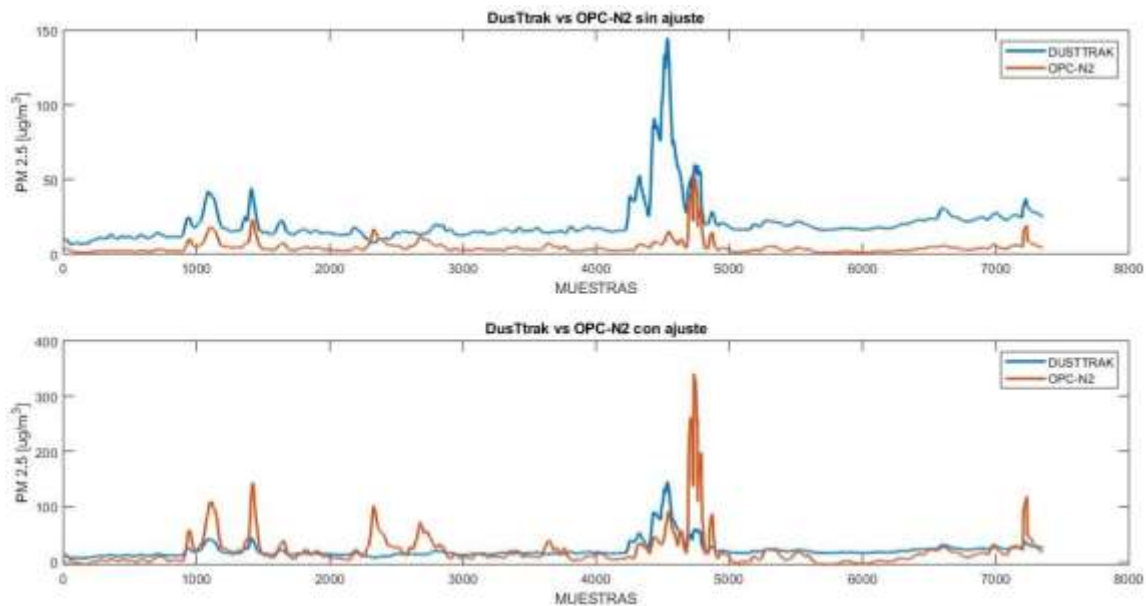


Figura 48. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-N2) de prueba en vía Girón.

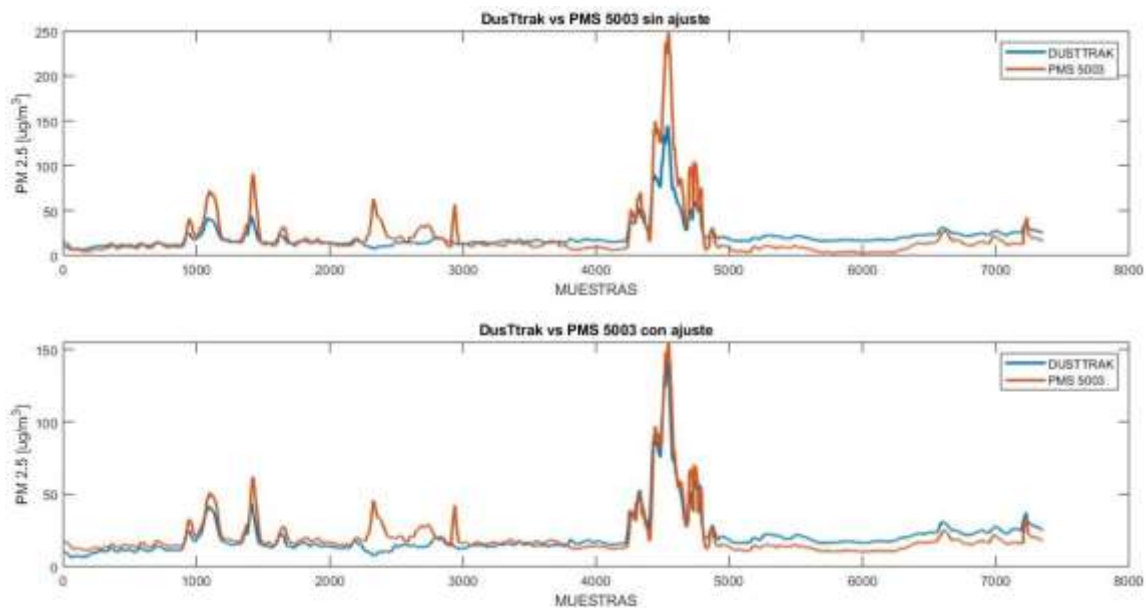


Figura 49. Concentración PM 2.5 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS 5003) de prueba en vía Girón.

5.2.5 Ajustes de pruebas PM 10. En este caso para el opc se usaron dos ecuaciones de ajuste, debido a que una ecuación no fue suficiente para todas las concentraciones de PM , debido a que en la prueba de construcción UIS se evidencia concentraciones mas altas de PM. Las ecuaciones usadas para el ajuste son las siguientes:

$$PMS = 1,909 * referencia - 2,288$$

$$OPC = 0,1504 * referencia + 1,1571$$

Para muestras cuyos valores son altos ($>500 [\mu g/m^3]$) y con cambios bruscos en PM10 tal como se aprecia en la prueba de construcción UIS, el OPC-N2 sobreestima, es por esto que se hace uso de esta segunda ecuación.

$$OPC = 4,14 * referencia - 83,24$$

Esto se debe quizás a que la linealidad del OPC-N2 en concentraciones altas y con cambios abruptos de PM10 se ve afectada.

A continuación se presentan las gráficas con el ajuste realizado de las diferentes pruebas de PM 10

5.2.6 Carrera 33 con calle 52. Se realizo el ajuste por R^2 usando la ecuación obtenida de la regresión lineal

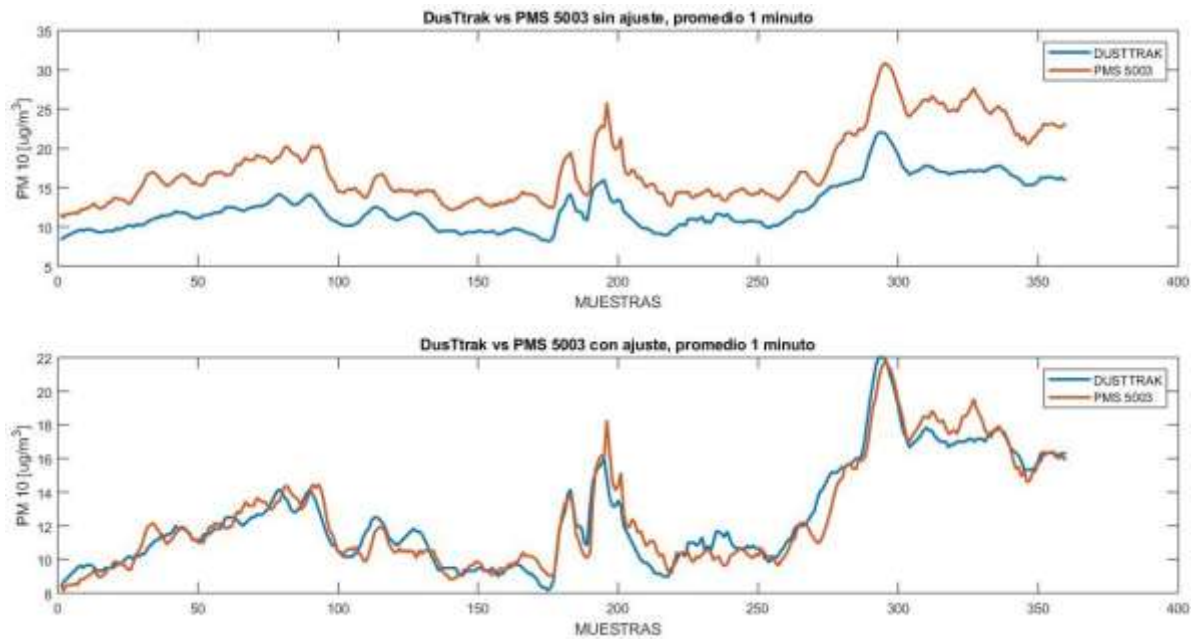


Figura 50. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (PMS 5003).

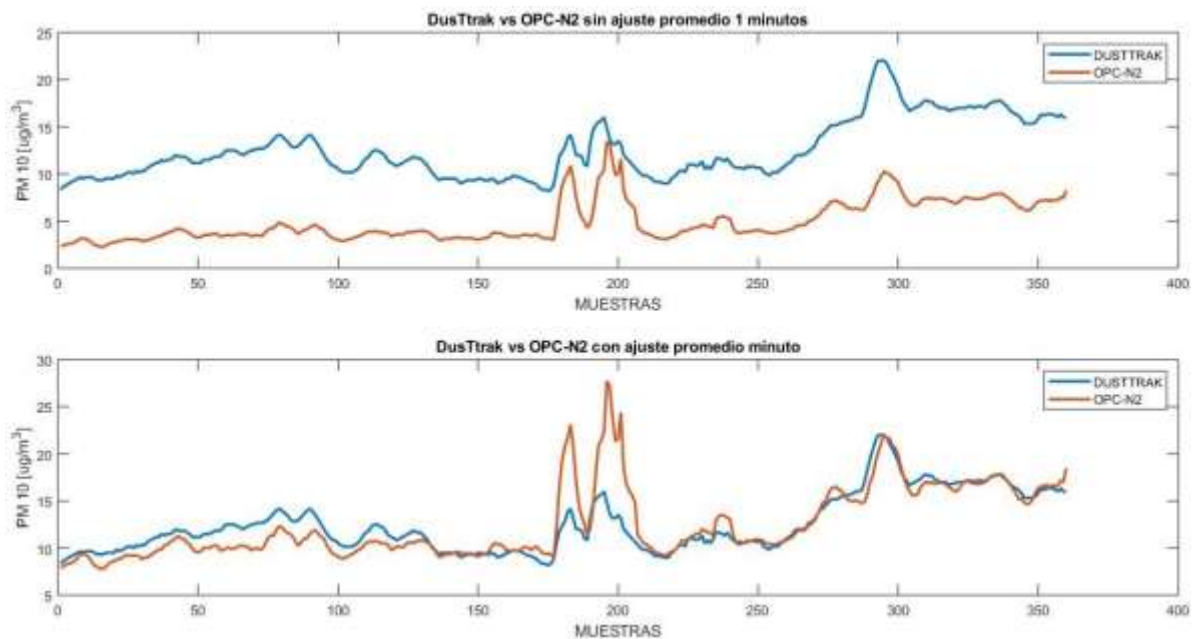


Figura 51. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (OPC-N2).

5.2.7 Construcción UIS. Se realizó el ajuste por R^2 usando la ecuación obtenida de la regresión lineal

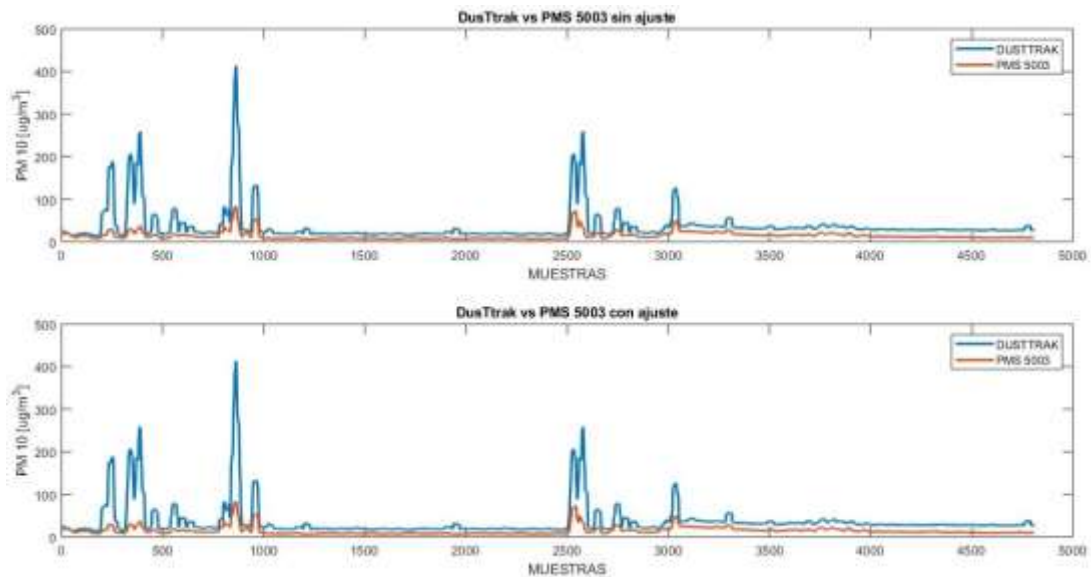


Figura 52. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (PMS 5003).

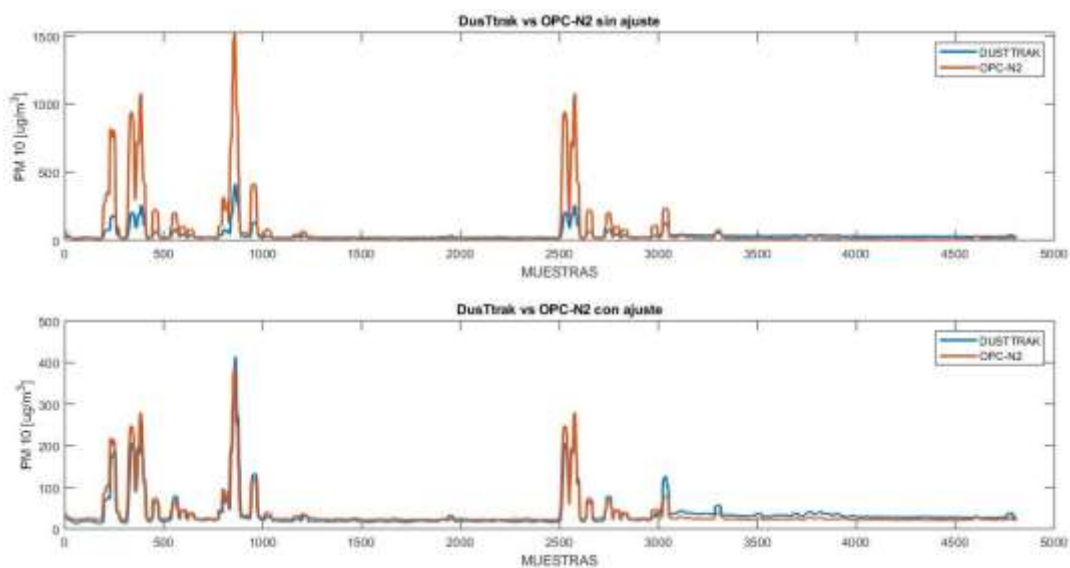


Figura 53. Concentración PM 10 con promedio móvil de 1 minuto con ajuste y sin ajuste (OPC-N2).

5.2.8 Vía Girón. Se realizó el ajuste por R^2 usando la ecuación obtenida de la regresión lineal

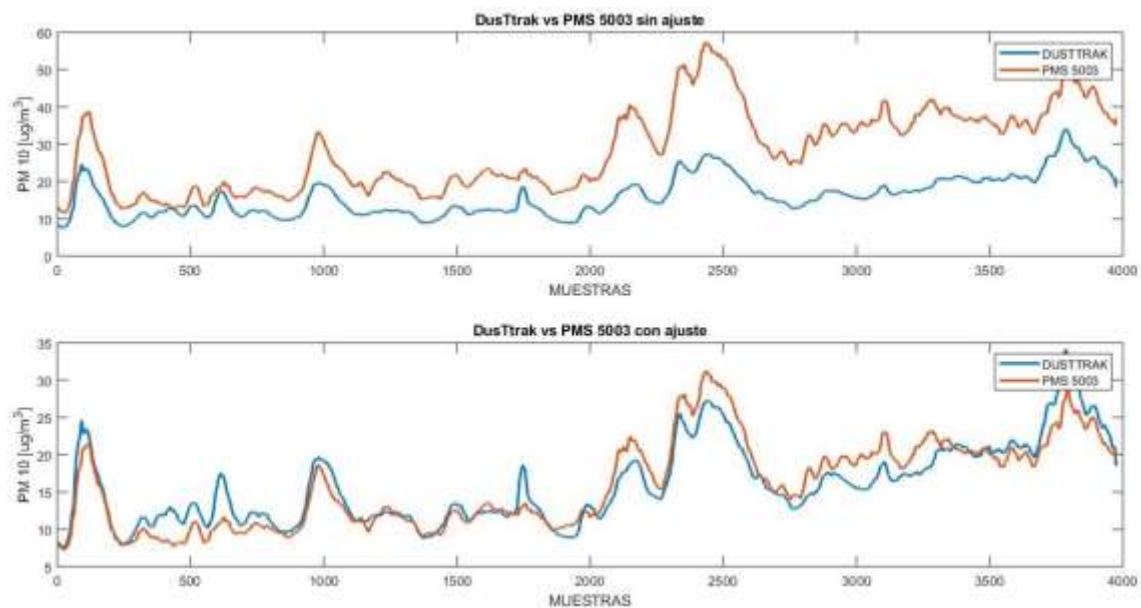


Figura 54. Concentración PM 10 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (PMS 5003).

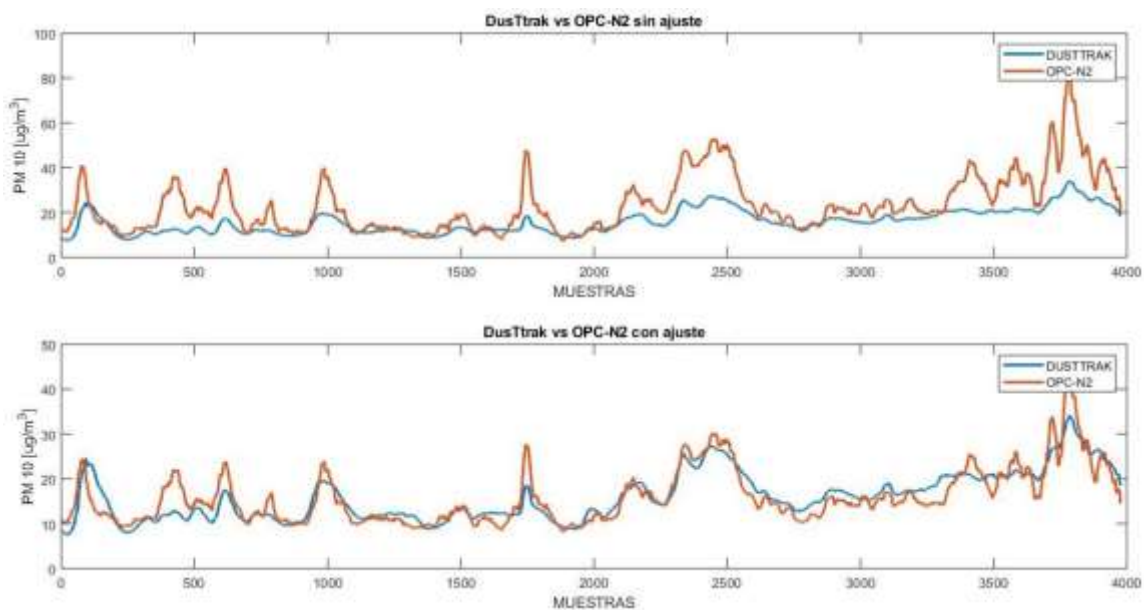


Figura 55. Concentración PM 10 con promedio móvil de 5 minutos con ajuste y sin ajuste (OPC-N2).

Como se ha logrado estipular anteriormente se observa una disminución del error de los sensores ópticos respecto al de referencia; y esto se aprecia en el valor de RMSE (ANEXO C.4) de cada prueba que se presenta a continuación

Tabla 8.

Comparación de RMSE antes y después del ajuste

PRUEBA	RMSE PMS	RMSE PMS_AJUS	RMSE_OP C	RMSE OPC_AJUS
Carrera 33 (PM 2.5)	5.310	4.217	0.951	5.721
Jardín UIS (PM 2.5)	137.369	80.853	115.012	27.754
Vía Giron (PM 2.5)	12.00	7.067	4.363	29.00
Carrera 33 (PM 10)	1.272	0.879	1.251	2.227
Construcción UIS	9.980	5.228	61.168	14.760
Vía Giron (PM 10)	4.361	2.284	5.845	2.814

5.3 Análisis de resultados

Los resultados de las comparaciones de los sensores ópticos PMS 5003 y OPC-N2 frente al DusTrak mostraron que en la mayoría de los casos todos siguen el mismo perfil de concentración de PM, pero el OPC.N2 y PMS 5003 realizan una sobre estimación de PM al referirse con el DusTrak, se puede observar como en la mayoría de las pruebas el PMS 5003 tiene una mejor correlación con el sensor de referencia. El OPC-N2 encontró una mejor correlación en la medición de PM 10 en comparación de sus lecturas de PM 2.5 ya que al medir PM 10, se encuentran coeficientes de correlación mas altos, también cabe recalcar que en las pruebas presentadas en la tabla no se presentó una alta humedad relativa en el ambiente, exceptuando la prueba Vía Girón.

La compilación del conjunto de pruebas deja en evidencia que la mejor respuesta ofrecida por estas referencias de sensores de LC, se dan en concentraciones bajas de PM, tal como se observa en las pruebas “día sin carro” y “vía Girón”; en las que se encuentran coeficientes de correlación mayor a 0.8; además se destaca que el cambio de PM no presentó cambios abruptos en comparación a otras pruebas, sin embargo las pruebas de mayor concentración en las que se encuentran a su vez cambios abruptos de PM dan como resultado una peor correlación.

En las pruebas de temperatura y humedad diferentes a las ambientales, la figura 4.17 permite ver a que las ondulaciones presentadas en la concentración de PM son similares a las presentadas por la humedad relativa. Otro detalle representativo ocurre desde la muestra 0 a la 2000, en donde se presenta un *BIAS* bastante reducido, y justamente la humedad no presenta cambios bruscos, pero desde la muestra 2000 en adelante el *BIAS* aumenta y justamente en ese preciso instante la humedad varía en gran proporción. A pesar de presentarse una clara oscilación de la humedad, el perfil entre ambos sensores es muy similar; quizás se deba a que las variaciones de humedad ocurren muy lentas, por ejemplo la variación más fuerte ocurre cuando se disminuye de un 66,72 a un 25,19 % en el transcurso de 936 muestras (2 horas y 36 minutos). Las pruebas de alta humedad dan a concluir que el PMS 5003 se ve afectado enormemente por los cambios bruscos de humedad y temperatura relativa; ya que además de tener un *offset* en promedio de 18 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respecto al OPC N2, en ningún momento sigue el patrón de este, como en la figura 4.18. Por otro lado el OPC-N2 evidencia un comportamiento ruidoso a pesar de no existir perturbaciones provocadas.

Respecto a los ajustes de datos, en la figura 5.1 y 5.2 se aprecia la prueba realizada en la carrera 33 con calle 52 de la figura 4.2 donde al aplicar el ajuste se encuentra mayor parecido en las concentraciones de PM ya que las gráficas coinciden de una mejor manera. Por otro lado los valores de RMSE son mejores en las pruebas de bajas concentraciones, como se puede observar al

utilizar la ecuaciones con mejor R^2 , el valor de RMSE cambia presentando una disminución en los datos tomadas por el PMS 5003; sin embargo se pueden observar pruebas que se ajustan mejor que otras. Con el OPC-N2 se observa que en 3 pruebas diferentes el valor de RMSE aumenta, lo que quiere decir que el ajuste realizado no es el mas adecuado debido a su desempeño respecto al equipo de referencia. Al comparar gráficamente los datos sin procesar respecto a los procesados como en la figura 5.1, se clarifica que el ajuste con el modelo lineal reduce significativamente el error del dato (siempre y cuando se seleccione una ecuación correspondiente a las variaciones de PM) ofreciendo una confiabilidad mayor.

En cuestión de desempeño, el PMS 5003 destaca con y sin el ajuste (a condiciones ambientales normales); ya que este siempre mantuvo un perfil similar al del equipo de referencia, ofreciendo la posibilidad de arrojar buenos resultados al momento de aplicar el modelo lineal, por ello para la implementación de una estación de monitoreo de PM de bajo costo, el PMS 5003 es el sensor mas óptimo, siempre y cuando se midan concentraciones bajas de PM sin embargo en este estudio no se tuvo en cuenta el tiempo de vida de los sensores, debido a esto no se puede estimar el tiempo en que los sensores responderán de manera correcta.

6. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

1. **Desempeño respecto al Dusttrak:** El desempeño de ambos sensores, evaluados ante condiciones ambientales normales se concluye que:

El OPC-N2 tuvo un buen desempeño respecto al Dusttrak en términos de tiempo de reacción y óptima cuantificación de concentraciones altas de PM ($>500 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$) con valores de R^2 comprendidos entre 0.7 a 0.88. Cabe recalcar que fue necesario de una segunda ecuación para ajustar las pruebas con concentraciones altas y con cambios abruptos de PM10, esto concluye que la linealidad tiene un cambio significativo en la cuantificación de este tamaño de partícula. por otro lado no tuvo un buen comportamiento ante concentraciones bajas ya que el valor de R^2 fue bastante variable en el transcurso las pruebas.

Se encontró una mejor correlación de los sensores a bajas concentraciones de PM

El PM 5003 tuvo un buen desempeño a concentraciones bajas ($<500 [\mu\text{g}/\text{m}^3]$) con valores de R^2 comprendidos entre 0.8 y 0.93, pero también arrojó un comportamiento aceptable a concentraciones altas con valores de R^2 comprendidos entre 0.5 y 0.7.

2. Desempeño respecto a humedad y temperatura: El OPC-N2 tuvo un buen desempeño en términos de perfil ante cambios repentinos de humedad y temperatura, pero se vio afectado en su escala de cuantificación ya que esta sufrió un comportamiento decreciente.

PMS 5003 se vio afectado enormemente por los cambios repentinos de humedad y temperatura, ya que no reaccionó a ningún tipo de perturbación.

Cuando la humedad no presentaba variaciones abruptas como en la figura 4.17 la trama de datos de ambos sensores tuvo una especie de *offset* que presentó una forma muy similar a la de la humedad, pero este comportamiento no se mostró en todas las pruebas. Por ende no fue posible generar un modelo que tuviera en cuenta el aporte de la humedad y temperatura en la concentración de PM arrojada por los sensores, ya que no se presentaron patrones repetitivos relacionados a estas dos variables en el transcurso de las pruebas.

3. **Repetibilidad entre sensores de bajo costo:** Al analizar los resultados de las distintas pruebas, fue evidente que ambos sensores arrojaron concentraciones distintas a pesar de estar ubicados en el mismo entorno de medición, es por esto no se puede determinar de una forma precisa la veracidad de las concentraciones arrojadas por la estación a pesar de los ajustes realizados. Sin embargo con estos sensores ópticos se pueden determinar las posibles variaciones de PM que se presenten en el ambiente.

4. **Recomendaciones de plataforma Web:** Se recomienda mejorar La plataforma IOT, ya que si se cuenta con un servidor web con mayores prestaciones en cuestión de volumen de datos de transmisión, se lograría implementar una amplia red de monitoreo.

5. **Recomendaciones de interfaz Web:** La pagina web podría mejorarse en la interfaz entre usuario y dispositivo, ya que por ejemplo, se podría crear una interfaz que interactúe mas con el control de la estación, filtrado de datos y ejecución de actualizaciones de forma remota.

6. **Trabajo futuro:** Al comparar el desempeño de las dos referencias de sensores de bajo costo se concluye que el mejor sensor para arrojar un índice indicativo de calidad del aire en un entorno ambiental común (concentraciones moderadas de 0-200 $[\mu g/m^3]$ con una humedad y temperatura con variaciones lentas) es el PM 5003; ya que esta referencia arrojó valores de R^2 entre 0,7 y 0,9, en entornos ambientales comunes.

Es por esto que sería conveniente rediseñar la estación haciendo uso de dos sensores PMS 5003 con la intención de realizar redundancia en la medida y además involucrar sensores que evalúen más variables ambientales que influyan en el comportamiento del PM para así poder aplicar procesamiento con machine learning y lograr minimizar los errores que afectan la confiabilidad del dato.

Referencias Bibliográficas

- Alphasense. (abril 2015). Alphasense user manual opc-n2 optical particle counter. Descargado de http://stg-uneplive.unep.org/media/aqm_document_v1/Blue%20Print/Components/Microcomputer%20and%20sensors/B.%20Dust%20Sensor%20Specifications/B.1%20Alphasense%20OPC%20N1/072-0300%20OPC-N2%20manual%20issue%203.pdf
- Austin, E., Novosselov, I., Seto, E., y Yost, M. (2015, 09). Laboratory evaluation of the shinyei ppd42ns low-cost particulate matter sensor. *PloS one*, 10 , e0137789. doi: 10.1371/journal.pone.0137789
- Bart, M., Williams, D. E., Ainslie, B., McKendry, I., Salmond, J., Grange, S. K., . . . Henshaw, G. S. (2014). High density ozone monitoring using gas sensitive semiconductor sensors in the lower fraser valley, british columbia. *Environmental Science & Technology*, 48 (7), 3970-3977. Descargado de <https://doi.org/10.1021/es404610t> (PMID: 24579930) doi: <https://doi.org/10.1021/es404610t>
- Broday, D., y Jovašević-Stojanovic, M. (2017, 10). Wireless distributed environmental sensor networks for air pollution measurement—the promise and the current reality. *Sensors*, 17 , 2263. doi: 10.3390/s17102263
- Castell, N., R Dauge, F., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., . . . Bartonova, A. (2016, 12). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99 . doi: 10.1016/j.envint.2016.12.007
- Castell, N., Viana, M., Minguillón, M., Guerreiro, C., y Querol, X. (2013). Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring.
- Cross, E. S., Williams, L. R., Lewis, D. K., Magoon, G. R., Onasch, T. B., Kaminsky, M. L., . . . Jayne, J. T. (2017). Use of electrochemical sensors for measurement of air pollution: correcting interference response and validating measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10 (9), 3575–3588. Descargado de <https://www.atmos-meas-tech.net/10/3575/2017/> doi: <https://doi.org/10.5194/amt-10-3575-2017>

EcuRed. (2012). Lenguaje de marcado de hipertexto. Recuperado de <https://www.ecured.cu/Html>.

Emily G. Snyder, P. A. S. E. D. T. R. W. W. G. S. W. H. D. S. D. A. H. V. J. K. P. W. P., Timothy H. Watkins. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. Faraday Discuss.. Descargado de <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es4022602> doi: 10.1021/es4022602

EPA. (s.f.). How to evaluate low-cost sensors by collocation with federal reference method monitors. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-01/documents/collocationinstructionguide.pdf>:

Fishbain, B., Lerner, U., Castell, N., Cole-Hunter, T., Popoola, O., Broday, D., . . . Bartonova, A. (2016, 09). An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units. Science of The Total Environment, -. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv> .2016.09.061 for Atmospheric Science, C. (2017). Topical particle counters. <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/opc/>.

Glantschnig, W. J., y Chen, S.-H. (1981, Jul). Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation. Appl. Opt., 20 (14), 2499–2509. Descargado de <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-20-14-2499> doi: 10.1364/AO.20.002499

INDUSTRIES, I. A. C. E. (s.f.). Generic standard on printed board design. <https://www.ipc.org>.

INNOVATION, T. S. (2011). Monitor de aerosoles dusttrak. <https://www.tsi.com/content.aspx?id=19457>.

KandRSmith.org. (s.f.). Dht22, am2302, am2320, am2321, sht71, htu21d, si7021, bme280. Descargado de http://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_many.html#references

Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., . . . Britter, R. (2015, 02). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. Environment International, 75 , 199-205. doi: 10.1016/j.envint.2014.11.019

Lewis, A. C., Lee, J. D., Edwards, P. M., Shaw, M. D., Evans, M. J., Moller, S. J., . . . White, A. (2016). Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. Faraday Discuss., 189 , 85-103. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1039/C5FD00201J> doi: 10.1039/C5FD00201J

- Masson, N., Piedrahita, R., y Hannigan, M. (2015). Quantification method for electrolytic sensors in long-term monitoring of ambient air quality. *Sensors*, 15 (10), 27283–27302. Descargado de <http://www.mdpi.com/1424-8220/15/10/27283>
- McFarland, D. S. (2015). *Css: The missing manual* (4.a ed.). O'Reilly. mozilla y colaboradores individuales. (2018). What is javascript? Recuperado de: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/JavaScript>.
- N Carvlin, G., Lugo, H., Olmedo, L., Bejarano, E., Wilkie, A., Meltzer, D., . . . Seto, E. (2017, 08). Development and field validation of a community-engaged particulate matter air quality monitoring network in imperial, ca. *Journal of the Air Waste Management Association*, 67 . doi: <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1369471>
- Rai, A., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A., Di Sabatino, S., Ratti, C., . . . Rickerby, D. (2017, 06). End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of The Total Environment*, 607-608 , 691-705. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266
- Rao, S., Chirkov, V., Dentener, F., Van Dingenen, R., Pachauri, S., Purohit, P., . . . Schoepp, W. (2012, 01 de Dec). Environmental modeling and methods for estimation of the global health impacts of air pollution. *Environmental Modeling & Assessment*, 17 (6), 613–622. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9317-3> doi: 10.1007/s10666-012-9317-3
- Requerimientos de una arquitectura iot. (s.f.). Descargado de <https://www.chakray.com/es/5-requisitos-de-una-arquitectura-iot/>
- The php group. (s.f.). Introducción. Recuperado de <http://php.net/manual/es/introduction.php>.
- Yong, Z. (2016). Digital universal particle concentration sensor pms1003 series data manual. Descargado de http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms1003-manual_v2-5.pdf?sfvrsn=2
- Zíková, N., Hopke, P., y Ferro, A. (2016, 11). Evaluation of new low-cost particle monitors for pm2.5 concentrations measurements. *Journal of Aerosol Science*, 105 . doi: 10.1016/j.jaerosci.2016.11.010

Apéndices

Apéndice A. Códigos de programación usados para la lectura de los sensores y envío de *datos a la nube*

La programación se realizó haciendo uso de un librería para la adquisición de los datos de los sensores con en el OPC-N2 creada por el químico atmosférico David H Hagan en el año 2015.

La librería usada para la lectura del sensor PMS 5003 fue creada por un contribuyente de git hub Szymon Jakubiak en el año 2017.

La librería usada para la lectura del sensor BME-280 fue creada por un contribuyente de git hub del reino unido Richard Hull en el año 2016.

```
1
2
3 import numpy as np
4 #!/usr/bin/python
5 # -*- coding: utf-8 -*-
6
7
8 #Libreria PMS 5003 disponible en:
9 #https://github.com/dobra-dobra/Python_PMS5003/blob/master/pms5003.py
10
11 #Libreria OPC-N2 disponible en:
12 #https://github.com/dhhagan/py-opc
13
14 #Libreria BME 280 disponible en:
15 #https://pypi.org/project/RPi.bme280/
16
17
18
19
```

```

20 import datetime, os, os.path, serial, sys
21
22 import spidev
23 import opc
24 from time import gmtime, strftime, sleep, time
25 import os.path as path
26 import urllib2
27 import smbus2
28 import bme280
29
30
31 import logging, logging.handlers
32
33 import RPi.GPIO as GPIO
34
35
36 periodo_muestreo = 10                                #EN SEGUNDOS
37 fecha = strftime("%d_%m_%y")
38 fechapantalla = strftime("%d/%m/%y")
39 horapantalla = strftime("%H:%M:%S")
40
41
42 #PMS 5003
43 DATA_FRAME_LENGTH = 28
44 CMD_FRAME_LENGTH = 4
45 MAX_TOTAL_RESPONSE_TIME = 12
46 port = serial.Serial('/dev/serial0', baudrate=9600, timeout=2.0)
47 eof = "\xff\xff\xff"
48 #####
49
50 #BME 280
51 port1 = 1
52 address = 0x76
53 bus = smbus2.SMBus(port1)
54
55 calibration_params = bme280.load_calibration_params(bus, address)
56 data = bme280.sample(bus, address, calibration_params)
57 #####
58
59 for i in range(9):
60     archivo_pms = fecha + '_pms' + str(i) + '.csv'
61     archivo_opc = fecha + '_opc' + str(i) + '.csv'

```

```

63     if path.exists(archivo_pms and archivo_opc):
64
65         archivo_pms= fecha + '_pms' + str(int(archivo_pms[12]) +1) + '.
        csv'
66         archivo_opc= fecha + '_opc' + str(int(archivo_opc[12]) +1) + '.
        csv'
67
68     else:
69         break
70 #OPC-N2
71 spi = spidev.SpiDev()
72 spi.open(0, 0)
73 spi.mode = 1
74 spi.max_speed_hz = 500000
75
76
77
78
79
80 alpha = opc.OPCN2(spi)
81 alpha1 = opc._OPC(spi)
82
83
84 alpha.on() # Encendido OPC-N2
85
86 #####
87
88
89 #Funciones de gestion de datos de lectura PMS 5003
90 def int16bit(b):
91     return (ord(b[0]) << 8) + ord(b[1])
92
93 def buff2hex(b):
94     return " ".join("0x{:02x}".format(ord(c)) for c in b)
95
96
97 def read_pm_frame(_port):
98     frame = b''
99     start = datetime.datetime.utcnow()
100     while True:
101         b0 = _port.read()

```

```

102         if b0 != '':
103             logging.debug('Got char 0x%x from serial read()' % (ord(b0),))
104         )
105     else:
106         logging.debug('Timeout on serial read()')
107     if b0 == b'\x42':
108         b1 = _port.read()
109         if b1 == b'\x4d':
110             b2 = _port.read()
111             b3 = _port.read()
112             frame_len = ord(b2) + 256 + ord(b3)
113             if frame_len == DATA_FRAME_LENGTH:
114                 # Datos normales.
115                 frame += b0 + b1 + b2 + b3
116                 frame += _port.read(frame_len)
117                 if (len(frame) - 4) != frame_len:
118                     logging.error("Short read, expected %d bytes, got
119 %d" % (frame_len, len(frame) - 4))
120                     return None
121                 # Verificacion del dato (ultimos dos bytes).
122                 expected = int16bit(frame[-2:])
123                 checksum = 0
124                 for i in range(0, len(frame) - 2):
125                     checksum += ord(frame[i])
126                 if checksum != expected:
127                     logging.error("Checksum mismatch: %d, expected %d
128 " % (checksum, expected))
129                     return None
130                 logging.debug("Received data frame = %s" % (buff2hex(
131 frame),))
132                 return frame
133             elif frame_len == CMD_FRAME_LENGTH:
134                 # Marco de respuesta de comando.
135                 frame += b0 + b1 + b2 + b3
136                 frame += _port.read(frame_len)
137                 logging.debug("Received command response frame = %s"
138 % (buff2hex(frame),))
139                 return frame
140             else:
141                 # Marco inesperado.
142                 logging.error("Unexpected frame length = %d" % (
143 frame_len))

```

```

138         time.sleep(MAX_TOTAL_RESPONSE_TIME)
139         _port.flushInput()
140         return None
141
142     if (datetime.datetime.utcnow() - start).seconds >=
MAX_TOTAL_RESPONSE_TIME:
143         logging.error("Timeout waiting data-frame signature")
144         return None
145
146 def data_frame_verbose(f):
147     return (' PM1.0 (CF=1)  g /m : {};\n'
148            ' PM2.5 (CF=1)  g /m : {};\n'
149            ' PM10 (CF=1)  g /m : {};\n'
150            ' PM1.0 (STD)   g /m : {};\n'
151            ' PM2.5 (STD)   g /m : {};\n'
152            ' PM10 (STD)   g /m : {};\n'
153            ' Particles > 0.3 m count: {};\n'
154            ' Particles > 0.5 m count: {};\n'
155            ' Particles > 1.0 m count: {};\n'
156            ' Particles > 2.5 m count: {};\n'
157            ' Particles > 5.0 m count: {};\n'
158            ' Particles > 10.0 m count: {};\n'
159            ' Reserved: {};\n'
160            ' Checksum: {};\n'.format(
161                f['data1'], f['data2'], f['data3'],
162                f['data4'], f['data5'], f['data6'],
163                f['data7'], f['data8'], f['data9'],
164                f['data10'], f['data11'], f['data12'],
165                f['reserved'], f['checksum']))
166
167
168
169 file = open(archivo_pms, 'a')
170 file.write("datos" + ";" + "pm1" + ";" + "pm2.5" + ";" + "pm10" + "\n " )
171 file.close()
172
173 file = open(archivo_opc , 'a')
174 file.write("datos" + ";" + "pm1" + ";" + "pm2.5" + ";" + "pm10" + ";" + "TEMP
" + ";" + "HUM" + ";" + "PRES" + " \n " )
175 file.close()
176
177

```

```
178
179
180 timee=time()
181 while True:
182
183     try:
184         if (timee + periodo_muestreo < time()):
185             timee=time()
186             i=i+1
187             port.flushInput()
188             sleep(.1)
189             rcv = read_pm_frame(port)
190             res = {'timestamp': datetime.datetime.utcnow(),
191                   'data1':    int16bit(rcv[4:]),
192                   'data2':    int16bit(rcv[6:]),
193                   'data3':    int16bit(rcv[8:]),
194                   'data4':    int16bit(rcv[10:]),
195                   'data5':    int16bit(rcv[12:]),
196                   'data6':    int16bit(rcv[14:]),
197                   'data7':    int16bit(rcv[16:]),
198                   'data8':    int16bit(rcv[18:]),
199                   'data9':    int16bit(rcv[20:]),
200                   'data10':   int16bit(rcv[22:]),
201                   'data11':   int16bit(rcv[24:]),
202                   'data12':   int16bit(rcv[26:]),
203                   'reserved': buff2hex(rcv[28:30]),
204                   'checksum': int16bit(rcv[30:])
205                   }
206             logging.debug("Got valid data frame:\n" + data_frame_verbose(
207                 res))
208
209             pr1 = res['data1']
210             pr2 = res['data2']
211             pr3 = res['data3']
212             a=alpha.pm()
213             print("MUESTRA:" + str(i))
214             print("DATOS PMS")
215             print("PM 1.0 g / m : " + str(pr1))
216             print("PM 2.5 g / m : " + str(pr2))
217             print("PM 10 g / m : " + str(pr3))
218
```

```

219         print("\n")
220
221
222
223
224         print("DATOS OPC")
225         print("PM 1.0  g /m  :  " + str(a["PM1"]))
226         print("PM2.5:  " + str(round(a["PM2.5"])))
227         print("PM10:  " + str(a["PM10"]))
228
229         print("\n")
230         data = bme280.sample(bus, address, calibration_params)
231
232
233         print("TEMPERATURA  C :  " + str(round(data.temperature)))
234
235
236         print("HUMEDAD:  " + str(round(data.humidity)))
237
238         print(strftime("%a, %d ,    %b , %Y , %H: %M: %S"))
239         print("\n")
240         print("#####")
241
242
243
244         #OPC-N2
245         f2 = open(archivo_opc , "a")
246
247         opc1 = str("{0:.2f}".format(a["PM1"]))
248         opc25 = str("{0:.2f}".format(a["PM2.5"]))
249         opc10 = str("{0:.2f}".format(a["PM10"]))
250
251         TEMPERATURA=str("{0:.2f}".format(data.temperature))
252         HUMEDAD = str("{0:.2f}".format(data.humidity))
253         PRESION = str("{0:.2f}".format(data.pressure))
254
255
256
257         f2.write( str(i) + ";" + str(opc1)  + ";" + str(opc25)  + ";"
+ str(opc10) + ";" + str(TEMPERATURA) + ";" + str(HUMEDAD) + ";" +
str(PRESION)  + ";" + strftime("%a, %d , %b , %Y , %H: %M: %S +000") + "
\n ")

```

```

258         f2.close
259
260         #PMS 5003
261
262         f = open(archivo_pms,"a")
263         f.write( str(1) + ";" + str(pr1) + ";" + str(pr2) + ";" +
264         str(pr3) + ";" +strtime("%a, %d, %b, %Y, %H: %M: %S +000") + " \n ")
265         f.close
266
267
268         #PANTALLA NEXTION
269
270         pms25 = str(pr2)
271         pms10 = str(pr3)
272
273
274
275         fechapantalla = strtime("%d/%m/%y")
276         horapantalla = strtime("%H: %M")
277
278
279         fullTemp = 'page0.t1.txt="'+ str(TEMPERATURA) +'"'+eof
280         fullhora='page0.t2.txt="'+ str(horapantalla) +'"'+eof
281         fullfecha='page0.t3.txt="'+ str(fechapantalla) +'"'+eof
282         fullHum = 'page0.t4.txt="'+ str(HUMEDAD) +'"'+eof
283
284         fullopc25 = 'page1.t4.txt="'+ str(opc25) +'"'+eof
285         fullopc10 = 'page1.t5.txt="'+ str(opc10) +'"'+eof
286         fullpms25 = 'page1.t2.txt="'+ str(pms25) +'"'+eof
287         fullpms10 = 'page1.t3.txt="'+ str(pms10) +'"'+eof
288         fullmuestra = 'page1.t9.txt="'+ str(1) +'"'+eof
289
290
291
292
293         port.write(fullTemp)
294         port.write(fullHum)
295         port.write(fullopc25)
296         port.write(fullopc10)
297         port.write(fullpms25)
298         port.write(fullpms10)

```

```

299         port.write(fullfecha)
300         port.write(fullhora)
301         port.write(fullmuestra)
302
303
304     except KeyboardInterrupt:
305         break

```

Algoritmo A.1: Lectura de sensores

```

1
2 import requests
3 import json
4
5 def send_API(URL, muestra, dato1, dato2, dato3):
6     """ este metodo es para iniciar la comunicacion donde la base de
7     datos
8     retorna el init resp
9     """
10    data = {"muestra": muestra,
11           "dato1": dato1,
12           "dato2": dato2,
13           "dato3": dato3}
14
15    headers={"Authorization": "Token
16    af2b0b04fa263e7ec2ff9b6bc3f96bef22aea9ae"}
17    r = requests.post(URL, data=data, headers=headers)
18    if r.status_code==200:
19        print("HTTP status ok. {}".format(r.status_code))
20        r.close()
21    else:
22        print(r.status_code)
23
24 if __name__ == "__main__":
25     URL = "http://35.243.199.245/particulado/pms1"
26     muestra = 1
27     dato1 = 9
28     dato2 = 6
29     dato3 = 200
30     send_API(URL, muestra, dato1, dato2, dato3)

```

Algoritmo A.2: Envio de datos de PMS a la nube

```

1
2
3 def send_API(URL, muestra, dato1, dato2, dato3, temp, hum):
4     """ este metodo es para iniciar la comunicacion donde la base de
5     datos
6     retorna el init resp
7     """
8     data = {"muestra": muestra,
9            "dato1": dato1,
10           "dato2": dato2,
11           "dato3": dato3,
12           "temp": temp,
13           "hum": hum}
14
15     headers={"Authorization": "Token
16             af2b0b04fa263e7ec2ff9b6bc3f96bef22aea9ae"}
17     r = requests.post(URL, data=data, headers=headers)
18     if r.status_code==200:
19         print("HTTP status ok. {}".format(r.status_code))
20         r.close()
21     else:
22         print(r.status_code)
23
24 if __name__ == "__main__":
25     URL = "http://35.243.199.245/particulado/pms2"
26     muestra = 4
27     dato1 = 9
28     dato2 = 100
29     dato3 = 400
30     temp = 26
31     hum = 50
32     send_API(URL, muestra, dato1, dato2, dato3, temp, hum)

```

Algoritmo A.3: Envío de datos de OPC y BME280 a la nube

```

1
2 #if, elif, else, elif, else, elif
3
4
5
6
7 % hoja_1 = '04_01_00_opc1.csv';
8 % Nombre_documento = '04_01_00_opc1.csv';

```

```
8 Nombre_documento = 'ANALISIS.csv';
9 hoja_1 = 'ANALISIS';
10
11 Documento = xlsread(Nombre_documento, hoja_1); %Documentos
12 PMS_ESTACION = Documento(:,2);
13 PMS_ARDUINO = Documento(:,3);
14 OPC = Documento(:,6);
15 HUM = Documento(:,8);
16 TEMP = Documento(:,7);
17
18
19
20 PMS_SUAV= sma_10s_5min(PMS_ESTACION)';
21 OPC_SUAV = sma_10s_5min(OPC)';
22
23
24
25
26 OPC_SUAV_1_MIN = vppm_10s_1min(OPC);
27
28 PMS_SUAV_1_MIN = vppm_10s_1min(PMS_ESTACION);
29
30
31
32 % a = [PMS_SUAV DUST_SUAV ];
33
34
35 %
36 %
37 figure
38 subplot(4,1,1)
39 % subplot(2,2,1)
40 plot(OPC,'LineWidth',2)
41
42
43
44 % % plot(OPC,'LineWidth',2)
45 title('OPC')
46 xlabel('MUESTRAS')
47 ylabel('PM 10 [ug/m3]')
48 % legend('OPC')
49
```

```

50
51 subplot(4,1,2)
52 R= 253;
53 G= 122;
54 B= 21;
55 plot(PMS_ESTACION,'Color',[R/255,G/255,B/255],'LineWidth',2)
56 title('PMS')
57 xlabel('MUESTRAS')
58 ylabel('PM 10 [ug/m3]')
59 % legend('PMS')
60
61 subplot(4,1,3)
62 plot(HUM,'Color',[92/255,188/255,92/255],'LineWidth',2) %-22
63 title('HUMEDAD')
64 xlabel('MUESTRAS')
65 ylabel('%')
66
67 subplot(4,1,4)
68 plot(TEMP,'Color',[255/255,42/255,0/255],'LineWidth',2)
69 title('TEMPERATURA')
70 xlabel('MUESTRAS')
71 ylabel('° C ')
72
73
74
75 figure
76 subplot(2,1,1)
77 % subplot(2,2,1)
78 plot(OPC(280:length(OPC)),'LineWidth',2)
79
80 axis([0 280 0 250])
81
82 ylabel('PM 10 [ug/m3]')
83 yyaxis right
84 % % plot(OPC,'LineWidth',2)
85 plot(PMS_ESTACION(280:length(OPC)),'Color',[R/255,G/255,B/255],'LineWidth',2)
86 title('PMS Y OPC')
87 legend('OPC-N2','PMS 5003')
88 xlabel('MUESTRAS')
89 axis([0 280 0 250])
90

```

```

91
92 % legend('OPC')
93
94
95 % subplot(3,1,2)
96 % % R= 253;
97 % % G= 122;
98 % % B= 21;
99 % % plot(PMS_ESTACION(1:280),'Color',[R/255,G/255,B/255],'LineWidth',2)
100 % % axis([0 273 0 50])
101 %
102 % title('PMS')
103 % xlabel('MUESTRAS')
104 % ylabel('PM 10 [ug/m3]')
105 % % legend('PMS')
106
107 subplot(2,1,2)
108 plot(HUM(280:length(OPC)),'Color',[92/255,198/255,92/255],'LineWidth',2) %
    -22
109 yyaxis left
110 axis([0 280 61 69])
111 title('HUMEDAD Y TEMPERATURA RELATIVA')
112 xlabel('MUESTRAS')
113 ylabel('%')
114 yyaxis right
115 plot(TEMP(280:length(OPC)),'Color',[255/255,42/255,0/255],'LineWidth',2) %
    -22
116 grid on
117 ylabel(' C ')
118 legend('HUMEDAD','TEMPERATURA')
119 axis([0 280 21 24])
120
121
122
123 promedio = [];
124 % prom = [];
125
126
127 paso = 10;
128 for i=0:paso:length(HUM)-paso
129 promedio(i,i+1:i+paso+1) = mean(HUM(i+1:i+paso+1));
130

```

```

131 end
132
133
134
135 figure
136
137 subplot(3,1,1)
138 % subplot(2,2,1)
139 plot(OPC(280:length(OPC)), 'LineWidth', 2)
140
141
142
143 % % plot(OPC, 'LineWidth', 2)
144 title('OPC')
145 xlabel('MUESTRAS')
146 ylabel('PM 10 [ug/m3]')
147 % legend('OPC')
148
149
150 subplot(3,1,2)
151 R= 253;
152 G= 122;
153 B= 21;
154 plot(PMS_ESTACION(280:length(OPC)), 'Color', [R/255,G/255,B/255], 'LineWidth', 2)
155
156 title('PMS')
157 xlabel('MUESTRAS')
158 ylabel('PM 10 [ug/m3]')
159 % legend('PMS')
160 subplot(3,1,3)
161 plot(HUM(280:length(OPC)), 'Color', [92/255,188/255,92/255], 'LineWidth', 2) %
    -22
162 hold on
163 % DER = diff(HUM(paso));
164 plot(promedio(280:length(promedio)), 'LineWidth', 2)
165 xlabel('s')
166 yyaxis right
167 plot(diff(promedio(280:length(promedio))), 'LineWidth', 2)
168
169
170 OPC_SUAV_1 = sma_10s_5min(OPC(1:280));
171 PMS_SUAV_1 = sma_10s_5min(PMS_ESTACION(1:280));

```

```

171
172 figure
173 scatter(OPC_SUAV_1,PMS_SUAV_1,'filled')
174 xlabel('OPC-N2')
175 ylabel('PMS 5003')
176
177 hold on
178 x = linspace(0,max(OPC_SUAV_1));
179 y= 0.09914*x + 11 ;
180 plot(x,y,'k','LineWidth',2)
181 hold off

```

Algoritmo A.4: Muestra de algoritmo de Matlab usado para lectura de archivos csv

```

1 function [sma_ppm] = sma_10s_5min(data)
2 %UNTITLED6 Summary of this function goes here
3 % Detailed explanation goes here
4 s=length(data);
5 sma_ppm=[];
6 for i=1:1:s-30
7     sma_ppm(i)=(data(i)+data(i+1)+data(i+2)+data(i+3)+data(i+4)+data(i+5)
8         +data(i+6)+data(i+7)+data(i+8)+data(i+9)+data(i+10)+data(i+11)+data(i
9         +12)+data(i+13)+data(i+14)+data(i+15)+data(i+16)+data(i+17)+data(i+18)
10         +data(i+19)+data(i+20)+data(i+21)+data(i+22)+data(i+23)+data(i+24)+
11         data(i+25)+data(i+26)+data(i+27)+data(i+28)+data(i+29))/30;
12
13
14 end
15
16 sma_ppm(s)=data(s);
17 a= sma_ppm(s);
18 for j=1:1:29
19     sma_ppm(s-j)=(a+data(s-j))/(j+1);
20     a = a + data(s-j);
21 end
22
23 end

```

Algoritmo A.5: Muestra de algoritmo de Matlab usado para promedio móvil de 5 minutos

```

1 function [sma_ppm2] = vppm_10s_1min(data)
2
3

```

```
4 s=length(data);
5 sma_ppm2=[];
6 for i=1:1:s-6
7     sma_ppm2(i)=(data(i)+data(i+1)+data(i+2)+data(i+3)+data(i+4)+data(i
8         +5))/6;
9
10 end
11
12 sma_ppm2(s)=data(s);
13 a= sma_ppm2(s);
14 for j=1:1:5
15     sma_ppm2(s-j)=(a+data(s-j))/(j+1);
16     a = a + data(s-j);
17 end
18
19
20 end
```

Algoritmo A.6: Muestra de algoritmo de Matlab usado para promedio móvil de 1 minuto

Apéndice B. Gráficas de concentración de PM de todas las pruebas realizadas

En las diferentes pruebas realizadas se hizo el calculo del promedio móvil de los datos de cada 1 minuto y 5 minutos, esto con el fin de suavizar las gráficas y observar comportamientos mas a detalle acerca de las concentraciones de PM captadas por los sensores.

B1 Carrera 33 con calle 52 (PM 2.5)

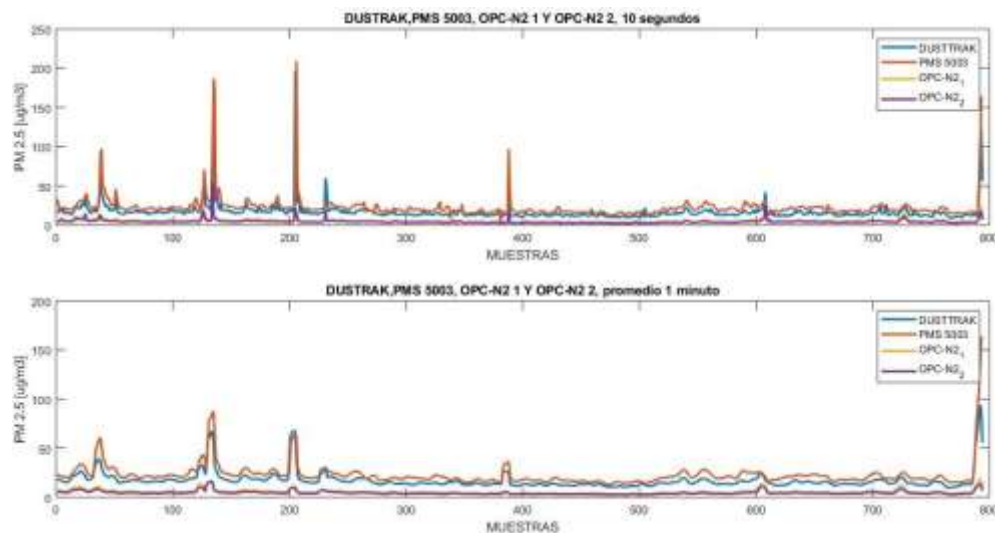


Figura B.1: Concentración de PM 2.5 carrera 33 con calle 52, datos estándares de 10 segundos y promediadas a 1 minutos

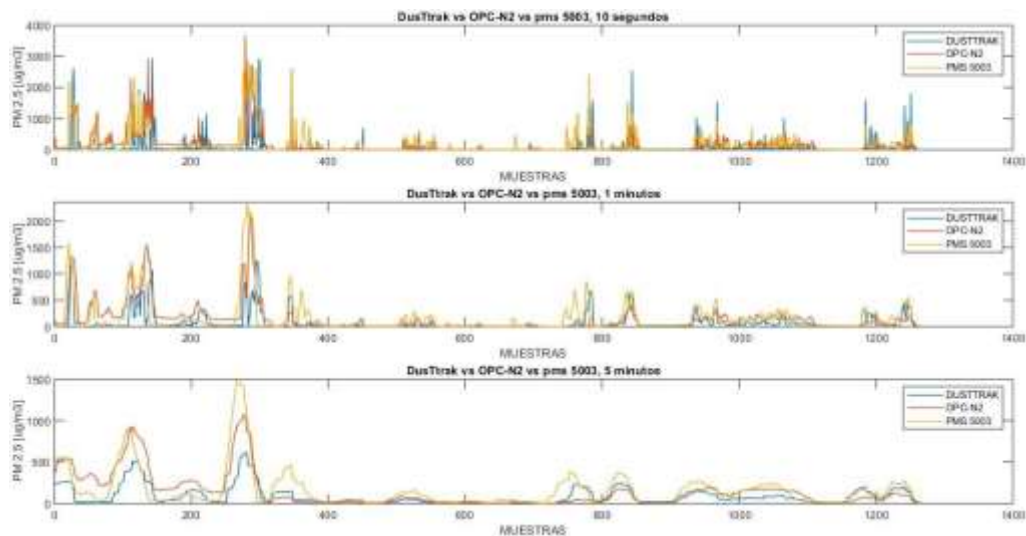
B2 Jardín de las orquídeas UIS (PM 2.5)

Figura B.2: Concentración de pm 2.5 en el jardín de las orquídeas UIS, datos estándares de 10 segundos, promediadas a 1 minutos y 5 minutos

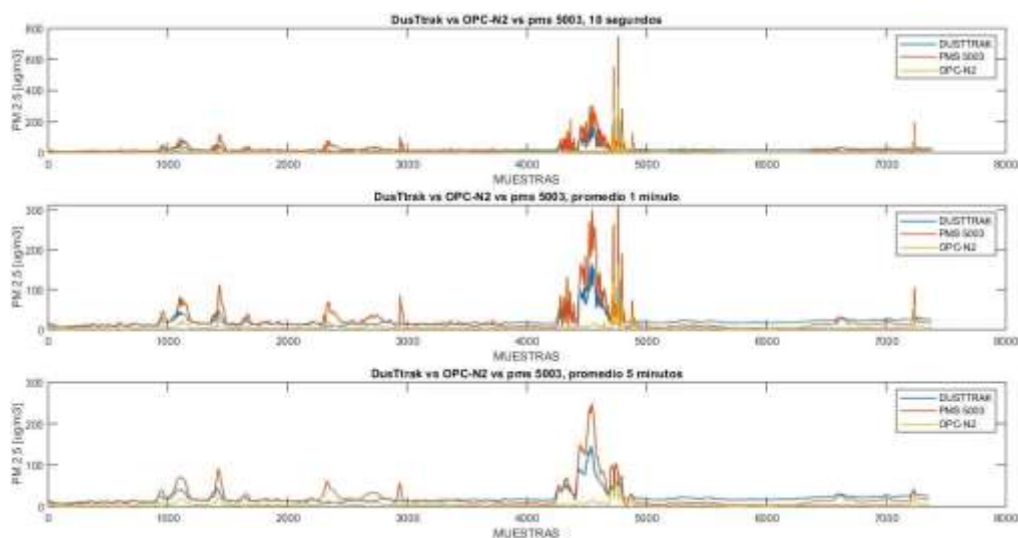
B3 Vía Girón (PM 2.5)

Figura B.3: Concentración de PM 2.5 en vía Giron, datos estándares de 10 segundos, promediadas a 1 minutos y 5 minutos

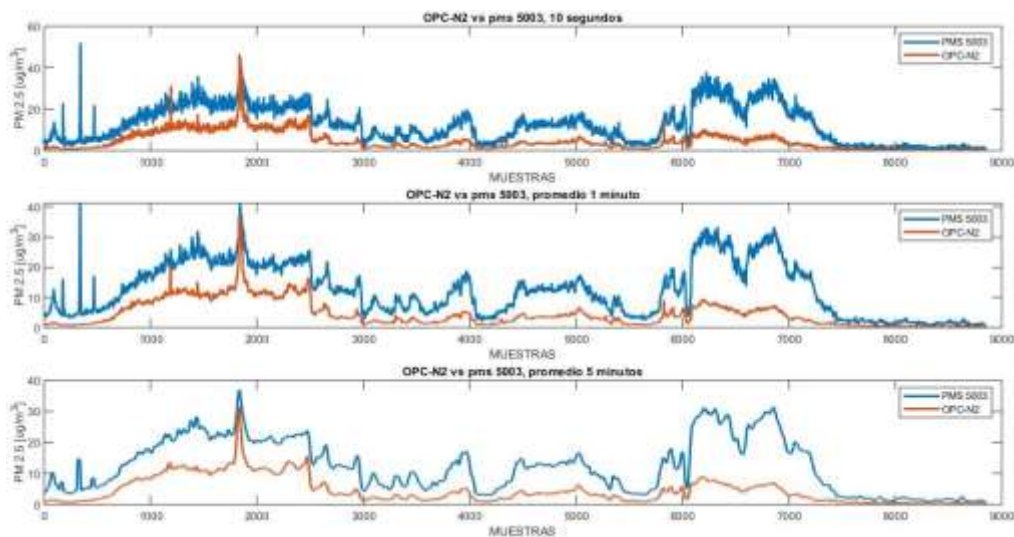
B4 Halley (PM 2.5)

Figura B.4: Concentración de PM 2.5 en Halley, datos estándares a 10 segundos, promediadas a 1 minutos y 5 minutos

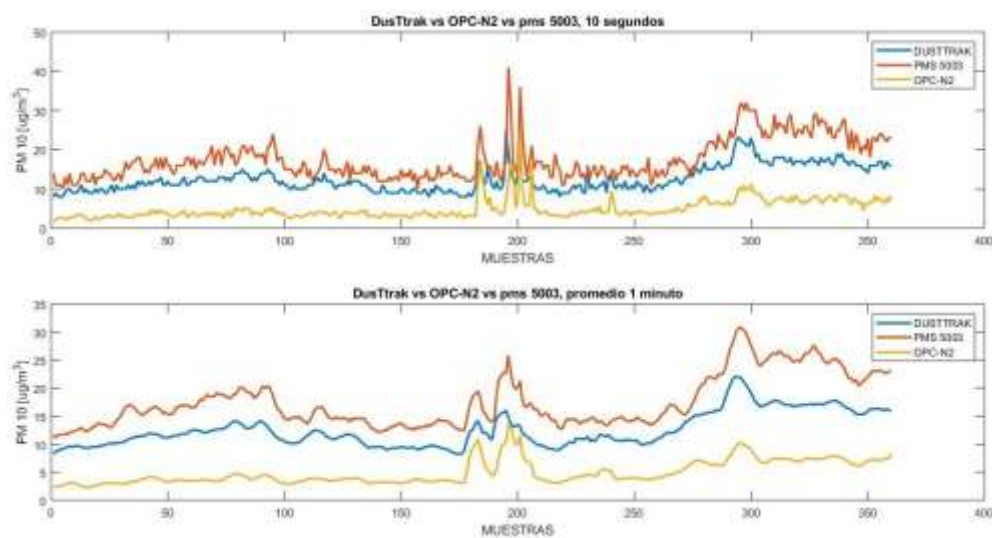
B5 Carrera 33 calle 52 (PM 10)

Figura B.5: Concentración de PM 10 en carrera 33 con calle 52, datos estándares a 10 segundos y promediadas a 1 minutos

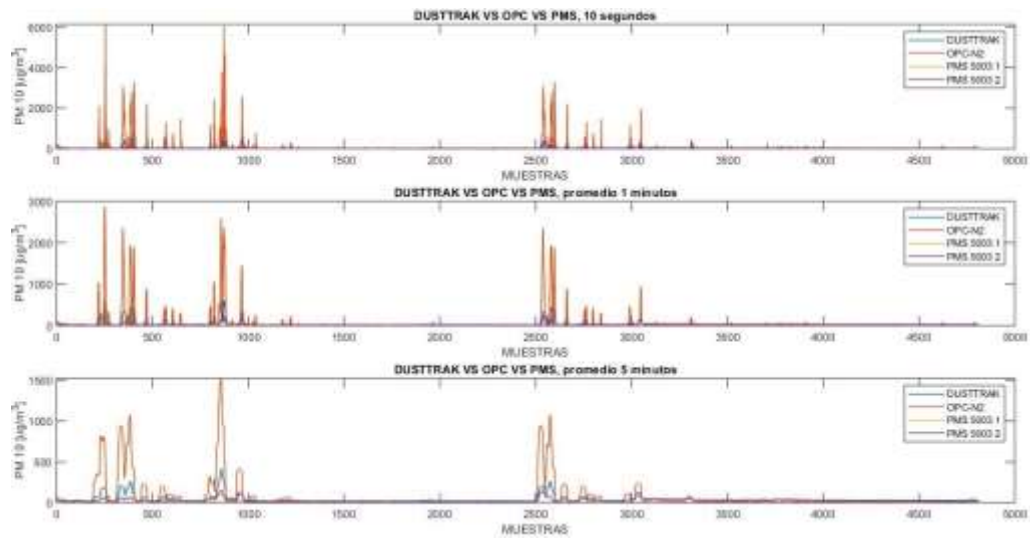
B6 Construcción UIS (PM 10)

Figura B.6: Concentración de PM 10 construcción carrera 30 UIS, datos estándares a 10 segundos, promediadas a 1 minutos y 5 minutos

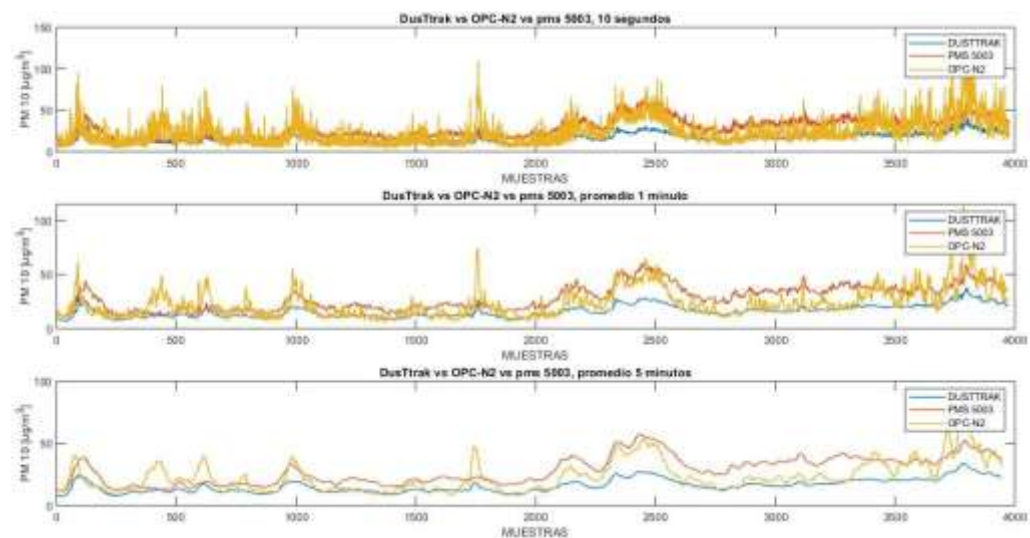
B7 Vía Girón (PM 10)

Figura B.7: Concentración de PM 10 en vía Girón, datos estándares a 10 segundos, promediadas a 1 minutos y 5 minutos

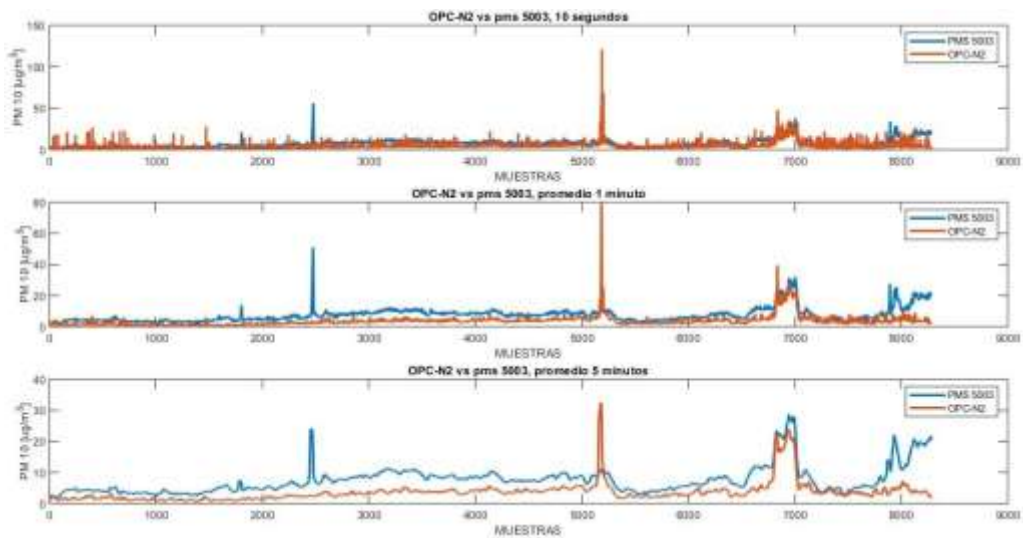
B8 Halley (PM 10)

Figura B.8: Concentración de PM 10 en la terraza del edificio de Ciencias Humanas UIS, datos estándares a 10 segundos, promediadas a 1 minutos y 5 minutos

Apéndice C Ecuaciones para el cálculo de las variables estadísticas

C1 Coeficiente de determinación

En estadística, el coeficiente de determinación, denominado R^2 , es un estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo.

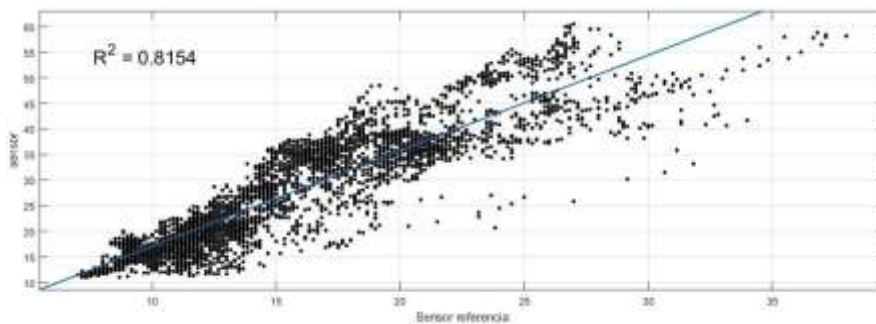


Figura C.1: Ajuste ordinario por mínimos cuadrados. Mientras puntos no disten mucho de la línea de la regresión, el coeficiente de determinación adoptará valores altos

C.1.1 Cálculo Si representamos por σ^2 la varianza de la variable dependiente, el coeficiente de determinación viene dado por la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2}$$

$$\sigma_X^2 \sigma_Y^2$$

$$X \quad Y$$

C2 Sesgo (Bias)

Se le conoce sesgo a la diferencia entre el valor medio y el verdadero valor de la magnitud medida. Se elimina calibrando el aparato. El sesgo pertenece al concepto de exactitud.

C.2.1 Cálculo El sesgo entre los sensores usados respecto al de referencia se encuentra haciendo uso de la siguiente ecuación

$$Bias = 100 \frac{sensor - sensor_{ref}}{sensor_{ref}}$$

C3 Promedio móvil

El promedio móvil es un indicador de tendencias que se usan para realizar análisis de datos anteriores con la finalidad de formar una serie de medidas que provengan de diversos subconjuntos de datos.

Cuando se realizan los análisis de series de tiempo, se usa el promedio móvil y de esa forma se puedan suavizar los datos y disminuir las dudas aleatorias en una determinada serie de tiempo.

$$PMS = \frac{PM + PM_{-1} + \dots + PM_{n-1}}{n}$$

Al calcular los valores sucesivos, un nuevo valor entra en la suma y un valor antiguo se elimina, lo que significa que una suma completa cada vez es innecesaria para este caso simple.

$$pSM = pSM_{prev} + \frac{pM}{n} - \frac{pM_{-n}}{n}$$

C4Raíz del error cuadrático medio

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (real_i - estimado_i)^2}$$

Este término estadístico determina el error de estimación del modelo lineal respecto al dato real. Como se muestra en la fórmula anterior el RMSE resulta de la sumatoria del cuadrado del error simple (punto a punto), para obtener un valor positivo, porque este puede ser positivo o negativo. Posterior a esto se divide en el numero de muestras y finalmente se aplica la raíz cuadrada.

De esta manera se puede deducir que a mayor numero de muestras el RMSE podría tender a cero, pero lógicamente depende de la magnitud del error simple.