



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

División Académica de Ciencias Biológicas



**ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE  
TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

CRISTIAN MANUEL OSORIO DE LA CRUZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

M.I.P.A. SERGIO RAMOS HERRERA

EN CODIRECCIÓN DE:

DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA

Villahermosa, Tabasco. Noviembre de 2025



### Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día **21 de octubre de 2025**, el que suscribe **CRISTIAN MANUEL OSORIO DE LA CRUZ** alumno del Programa de **INGENIERIA AMBIENTAL** con número de matrícula **202G24079** adscrito a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como **autor del trabajo recepcional (TESIS)** presentado para la obtención del título de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, titulado **"ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO"** dirigido por el **DR. JOSÉ RAMÓN LAINES CANEPA**.

#### DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido del Desarrollo Tecnológico presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 21 de octubre de 2025.

Cristian Manuel Osorio de la Cruz  
Nombre y Firma del Tesista



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



**2025**  
AÑO DE LA  
Mujer  
Indígena

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab., a 22 de Octubre de 2025

**ASUNTO:** Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON  
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. CRISTIAN MANUEL OSORIO DE LA CRUZ** egresado de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: **“ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO”**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADEMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica  
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN



**2025**  
AÑO DE LA  
Mujer  
Indígena

OCTUBRE 22 DE 2025

**C. CRISTIAN MANUEL OSORIO DE LA CRUZ  
PAS. DE LA LIC. EN ING. AMBIENTAL  
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 111 al 113 del Cap. IV del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis denominado: **“ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO”**, asesorado por el MIPA. Sergio Ramos Herrera y Dr. José Ramón Laines Canepa sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el Dr. José Ramón Laines Canepa, Dra. Verónica Isidra Domínguez Rodríguez, MIPA. Sergio Ramos Herrera, MIPA. Elías de la Cruz Luna y MIA. Jesús Manuel Carrera Velueta.

**A T E N T A M E N T E  
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA  
DIRECTOR**

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.  
Archivo.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DIRECCIÓN



**2025**  
AÑO DE LA  
Mujer  
Indígena

21 de octubre de 2025

**C. CRISTIAN MANUEL OSORIO DE LA CRUZ**  
Egresado de la Lic. en Ingeniería Ambiental

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, se implementó la revisión del trabajo recepcional (**Tesis**), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad y el Código Institucional de Ética para la Investigación.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones, el índice de similitud y el reporte de originalidad obtenido a través de la revisión en la plataforma iThenticate de su trabajo recepcional **ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO.**

Se incluyó citas, se excluyó bibliografía y se estableció el umbral de exclusión de coincidencias pequeñas a 16 palabras.

<b>RESULTADO DE SIMILITUD</b>	<b>1 %</b>
	<b>60 páginas y 15446 palabras</b>

Finalmente, se le solicita al **C. CRISTIAN MANUEL OSORIO DE LA CRUZ**, integrar en la versión final del trabajo recepcional, este oficio y el informe de originalidad con el porcentaje de similitud de Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DR. ARTURO GARRIDO MORA**  
DIRECTOR

UJAT  
DIVISIÓN ACADÉMICA  
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



C.c.p. M.I.P.A. Sergio Ramos Herrera. Director de tesis  
C.c.p. Dr. José Ramón Laines Canepa. Codirector de tesis  
C.c.p. Archivo



# Cristian Manuel Osorio de la Cruz

## ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO CO...

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:515955584

Fecha de entrega

21 oct 2025, 7:49 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

21 oct 2025, 8:09 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Cristian Manuel Osorio de la Cruz\_TR tests.pdf

Tamaño del archivo

1.8 MB

60 páginas

15.446 palabras

77.964 caracteres



## 1% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 16 palabras)
- ▶ Abstract
- ▶ Trabajos entregados

### Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

### Fuentes principales

- 1% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alertas de Integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



### Fuentes principales

- 1% Fuentes de Internet
- 0% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
instesre.org		<1%
2	Internet	
dof.gob.mx		<1%
3	Internet	
forum.arduino.cc		<1%



Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 21 de octubre de 2025.

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTOR(A) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO". Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

COLABORADORES

Cristian Manuel Osorio de la Cruz  
Nombre y Firma del egresado

Nombre y Firma del director de tesis

TESTIGOS

Hector Jesus de la Cruz Herrera

Angel D.P.T.

Angel Daniel Paz Torres



### Dedicatoria

A Dios por acompañarme en todo este camino, por brindarme la fuerza de voluntad para escribir este trabajo, por darme los conocimientos y por motivarme a continuar cuando las dificultades parecían mayores.

Dedico este trabajo, con profundo cariño y gratitud, a mi padre Santiago Osorio Gómez, a mi madre Miguelina de la Cruz Pérez y a mi hermana Cinthia Elizabeth Osorio de la Cruz, por su amor incondicional, apoyo constante y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Su presencia en mi vida ha sido mi mayor fuerza.

También la dedico a los jóvenes investigadores que leen este trabajo, espero que sea una guía, como lo fueron para mí los autores referenciados aquí.

*“Dad gracias en todo, porque esta es la voluntad de Dios para con vosotros en Cristo Jesús.” - 1 Tesalonicenses 5:18.*

Con todo el esfuerzo, Cristian Manuel Osorio de la Cruz.



## Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por darme esta oportunidad en la vida, de ser un profesionista.

Agradezco profundamente al MIPA Sergio Ramos Herrera, por su guía, paciencia y valiosos comentarios durante el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y compromiso académico fueron fundamentales para lograr este proyecto.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y a la División Académica de Ciencias Biológicas, por brindarme las herramientas, recursos y espacios necesarios para mi formación profesional y la realización de esta investigación.

A mis profesores y profesoras miembros del comité sinodal, especialmente a Dr. José Ramon Láinez Canepa, por sembrar en mí el interés por la investigación y el compromiso con la ciencia.

A mi familia, en especial a mis padres y hermana, por su amor incondicional, su apoyo emocional y por estar siempre presentes en cada paso de este camino.

A mis amigas y amigos, compañeros de generación y colegas de campo, quienes me acompañaron durante largas jornadas de estudio, trabajo y risas. Gracias por su compañía y amistad.

Finalmente, a todas las personas que de alguna forma contribuyeron directa o indirectamente a la realización de esta tesis, gracias. Este logro también es de ustedes.



**Índice de Contenido**

Resumen	16
Palabras clave	16
Abstract	17
Keywords	17
1. Introducción	18
2. Justificación	20
3. Pregunta de investigación	21
4. Hipótesis	21
5. Objetivos	22
5.1 General	22
5.2 Específicos	22
6. Antecedentes	23
7. Marco Teórico	28
7.1 Material Particulado	28
7.2 Efectos a la Salud del Material Particulado	28
7.3 Principales Fuentes de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	30
7.4 Factores que Afectan la Medición de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	30
7.5 Calibración y Validación de Sensores de Bajo Costo	31
7.6 Arduino y Sensores de Bajo Costo	32
8. Metodología	36
8.1 Área de Estudio	36
8.2 Desarrollo del Dispositivo	37
8.3 Calibración de DBC	41
8.4 Programación Final del Dispositivo Desarrollado	42



# ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO



	13
8.5 Generación de Datos de Concentraciones de Partículas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	48
8.6 Análisis Estadístico de los Datos	48
9. Resultados	50
9.1 Desarrollo de Dispositivo Electrónico de Bajo Costo	50
9.2 Generación de Datos Para Calibración del Dispositivo	51
9.3 Curvas de Calibración del Dispositivo con Monitor de Referencia	53
9.4 Análisis Estadístico de las Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> , Estableciendo Valores Base y Comparación Entre Ambas Paradas	57
10. Discusión	66
11. Conclusiones y Recomendaciones	69
11.1 Conclusiones	69
11.2 Recomendaciones	70
12. Glosario	72
13. Referencias Citadas	73
14. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	79

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



**Índice de Tablas**

<b>Tabla 1</b>	29
<b>Tabla 2</b>	37
<b>Tabla 3.</b>	38
<b>Tabla 4</b>	41
<b>Tabla 5</b>	42
<b>Tabla 6</b>	45
<b>Tabla 7</b>	48
<b>Tabla 8</b>	53
<b>Tabla 9</b>	56
<b>Tabla 10</b>	59
<b>Tabla 11</b>	59

**Índice de Figuras**

<b>Figura 1</b>	32
<b>Figura 2</b>	33
<b>Figura 3</b>	33
<b>Figura 4</b>	34
<b>Figura 5</b>	35
<b>Figura 6</b>	36
<b>Figura 7</b>	39
<b>Figura 8</b>	39
<b>Figura 9</b>	40
<b>Figura 10</b>	40
<b>Figura 11</b>	50
<b>Figura 12</b>	51
<b>Figura 13</b>	52
<b>Figura 14</b>	53
<b>Figura 15</b>	55
<b>Figura 16</b>	57



ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE  $PM_{2.5}$  Y  $PM_{10}$  EN PARADAS DE TRANSPORTE  
USANDO SENSORES DE BAJO COSTO



	15
<b>Figura 17</b>	60
<b>Figura 18</b>	61
<b>Figura 19</b>	62
<b>Figura 20</b>	62
<b>Figura 21</b>	63
<b>Figura 22</b>	64

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México



## Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo principal determinar los niveles de concentración de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, temperatura y humedad relativa en dos paradas de transporte estudiantil, una parada local donde el flujo vehicular es menor y otra parada foránea donde el flujo vehicular es mayor, ambas situadas a las afueras de un campus universitario. Para ello se desarrolló un sistema de monitoreo ambiental basado en los sensores de bajo costo. También se utilizó un equipo portátil modelo Temtop 2000C como monitor de referencia para la calibración principalmente del sensor PMS5003. Durante el periodo de monitoreo la concentración de PM<sub>10</sub> fue hasta de 212 µg/m<sup>3</sup> en la parada local y hasta de 401 µg/m<sup>3</sup> en la parada foránea. Para las PM<sub>2.5</sub> la concentración fue hasta de 134 µg/m<sup>3</sup> y hasta de 252 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. La temperatura varió entre 26.6 y 34.7 °C en la parada local y entre 27.8 y 36.6 °C en la parada foránea. La humedad relativa varió entre 58 y 91 % en la parada local y entre 56 y 81 % en la parada foránea. La tendencia observada fue que la concentración de partículas es mayor en la parada foránea que en la parada local. El monitoreo no se llevó a cabo durante las primeras horas del día, en la tarde y en la noche, dado que a estas horas los puntos de interés se encuentran sin presencia de personas.

## Palabras clave

Arduino uno, monitoreo, PMS5003, DHT22, material particulado, concentraciones de partículas.



## Abstract

This study aimed to determine the concentration levels of particulate matter PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, temperature and relative humidity at two student bus stops: a local stop with lower traffic flow and a longer stop with higher traffic flow, both located on the outskirts of a university campus. An environmental monitoring system based on low-cost sensors was developed for this purpose. A Temtop 2000C portable monitor was also used as a reference monitor, primarily for calibrating the PMS5003 sensor. During the monitoring period, PM<sub>10</sub> concentrations reached up to 212 µg/m<sup>3</sup> at the local stop and up to 401 µg/m<sup>3</sup> at the longer stop. PM<sub>2.5</sub> concentrations reached up to 134 µg/m<sup>3</sup> and up to 252 µg/m<sup>3</sup>, respectively. The temperature ranged from 26.6 to 34.7 °C at the local bus stop and from 27.8 to 36.6 °C at the out-of-town bus stop. Relative humidity ranged from 58 to 91% at the local bus stop and from 56 to 81% at the out-of-town bus stop. The observed trend was that particle concentration was higher at the out-of-town bus stop than at the local bus stop. Monitoring was not conducted during the early morning, afternoon, or evening hours, as the points of interest were unoccupied at these times.

## Keywords

Arduino One, monitoring, PMS5003, DHT22, particulate matter, particle concentrations.



## 1. Introducción

La contaminación del aire que respiramos proviene de diversas fuentes, como los vehículos a combustión interna, que consumen gasolina y diésel, a partir de estos se generan gases y partículas las cuales quedan suspendidas y persisten en el ambiente. Las actividades como la construcción, carreteras, pavimentación, desgaste de neumáticos son fuentes de contaminantes primarios. Una vez que estos entran en la atmósfera, generan otros conocidos como secundarios y aumentan su carga en el aire que respiramos (EPA, 2024).

Un contaminante de gran interés actual es el material particulado (MP). Este consiste en gotas líquidas y partículas sólidas emitidas de forma directa o formadas en la atmósfera cuyo tamaño difiere y suelen clasificarse como  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Las primeras son cuyo diámetro aerodinámico es menor a  $10 \mu m$  y las segundas son aquellas cuyo diámetro menor a  $2.5 \mu m$  (EPA, 2024). Debido a su tamaño, estas partículas pueden penetrar al sistema respiratorio y generar diversos problemas de salud de tipo respiratorio. Por eso en México este contaminante está considerado un contaminante criterio y existe una norma, la NOM-025-SSA1-2021 que establece los límites máximos permitidos de este contaminante en el aire ambiente para la protección a la salud de las personas.

Para poder verificar el cumplimiento de la norma, se debe contar con datos de monitoreo. Normalmente estos datos se generan en puntos fijos de interés con estaciones de referencia administradas por el gobierno o instituciones públicas, dado que el equipo es costoso y su mantenimiento también. Además de evaluar el cumplimiento de la norma, los datos también se pueden utilizar para informar a la población acerca de la calidad del aire en tiempo real, mediante el cálculo del índice de Aire y Salud, aunque para esto se requiere de la medición preferentemente con equipo automático. Cuando no se cuenta con el recurso económico suficiente, se pueden implementar otras alternativas para generar datos de contaminantes. Este trabajo se centra en esta última



idea. A continuación, se expone principalmente la justificación, objetivos y metodología de esta propuesta de tesis.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México



## 2. Justificación

El equipo automático estándar o de referencia para la medición de partículas del aire es costoso. Por eso, ante la necesidad de generar información acerca de los contaminantes presentes en suelo, agua o aire, muchos han optado por emplear sensores de bajo costo (SBC) programados utilizando tarjetas electrónicas como Arduino o Ras Berry Pi. Ya que existe una gran cantidad de información en línea acerca de los diagramas de conexión y programación de los sensores, resulta atractivo el empleo de este método para desarrollar equipo para el monitoreo automático. Instituciones públicas y privadas están experimentando con esta tecnología y desarrollando sus propios métodos de calibración que les permitan generar información aceptable, por ejemplo, acerca de la calidad del aire en una zona de interés.

En la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) existe interés de parte de los ingenieros ambientales acerca de los niveles de concentración de partículas en dos paradas de transporte escolar aledañas a la División. Una de estas es para el transporte local y la otra es más para el transporte foráneo (traslado a municipios). En ambas existen concentración de estudiantes provenientes del campus.

Debido a la carencia de equipo portátil, se ha propuesto realizar las mediciones desarrollando el equipo usando SBC. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar los niveles de concentración existentes en el aire de dos paradas de transporte escolar del campus, a partir de mediciones realizadas con un dispositivo desarrollado utilizando Arduino más los sensores DHT22 y PMS5003. Ya se tiene experiencia en el desarrollo de dispositivos para la medición dentro de la División, pero no con un sensor de partículas. Este trabajo, contribuyó con aspectos metodológicos que serán útiles en el desarrollo de otros dispositivos para el monitoreo permanente de partículas y la transmisión de datos de forma inalámbrica. Además, los datos generados en este trabajo estarán a disposición de la comunidad universitaria de la DACBIOL.



### 3. Pregunta de investigación

- ¿Como se comportan las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en las paradas de transporte aledañas a la división académica DACBIOL, utilizada por los estudiantes?
- ¿Es confiable el monitoreo de partículas con Sensores de Bajo Costo?

### 4. Hipótesis

- Las campañas de monitoreo son confiables con datos recabados por Sensores de Bajo Costo, aplicando modelos matemáticos.
- Es importante el punto de monitoreo, ya que influye en el comportamiento de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  de las paradas de transporte.



## 5. Objetivos

### 5.1 General

**5.1.1.** Analizar los niveles de concentración de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en dos paradas de transporte estudiantil situadas frente a la DACBIOL, utilizando un sistema de monitoreo ambiental basado en sensores de bajo costo que registre datos de concentración, temperatura y humedad relativa, con el fin de establecer valores de fondo y comparar las diferencias entre ambos puntos de muestreo.

### 5.2 Específicos

**5.2.1.** Desarrollar un dispositivo de bajo costo para medir partículas  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , temperatura y humedad.

**5.2.2.** Generar datos temporales de las concentraciones base de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , temperatura y humedad en dos paradas de transporte frente a las instalaciones de la DACBIOL.

**5.2.3.** Realizar un análisis estadístico y comparativo de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  para establecer los valores base y diferencia entre las dos paradas.



## 6. Antecedentes

El monitoreo ambiental es un tema de gran relevancia en la actualidad, debido a su impacto en la salud pública y su impacto ambiental (World Health Organization, 2021). Los estudios más recientes coinciden en que las fuentes móviles contribuyen a las emisiones de material particulado (PM, por sus siglas en inglés), especialmente en zonas urbanas. Los equipos de bajo costo han incrementado debido a la demanda creciente de ampliar la cobertura de espacial y temporal de monitoreo (Ye et al., 2022).

De acuerdo con el artículo de Badura et al. (2018) se evaluó el desempeño de cuatro sensores de partículas PM<sub>2.5</sub> de bajo costo: SSDS011, ZH03A, PS7003 y OPC\_2, comparándolo con un analizador de partículas TEOM 1400a. Para evaluar la replicabilidad de cada modelo de sensor se estudiaron el comportamiento de cada sensor por triplicado y para cada modelo de sensor se calculó el coeficiente de variación (CV). El criterio que usaron fue que los sensores con CV menor a un 10% eran aceptables. Para evaluar el desempeño entre los sensores y el equipo TEOM de referencia, estimaron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), para diferentes tiempos promedios. De los cuatro sensores el PS7003 observó una alta relación lineal entre las medidas del sensor y el equipo de referencia (una  $R^2$  entre 0.83 y 0.89), para tiempos promedios de 1 min, 15 min, 1h y de 24 horas. El modelo OPCN\_2 fue el que alcanzó una relación lineal moderada, también se observó que la humedad relativa por encima del 80 %, tiende a sobre estimar las concentraciones de partículas en los sensores SDS011 y OPCN\_2.

En el contexto de la creciente necesidad, de sistemas de monitoreo accesibles Jacob et al. (2021) diseñó y puso a prueba un sistema portátil para el monitoreo de la calidad del aire exterior, con relación a gases y partículas PM<sub>2.5</sub> en tiempo real. El dispositivo contó con sistema de comunicación remota capaz de enviar información por voz, mensajes y datos. Esto fue útil para alertar y transmitir llamadas de emergencia si la concentración medida de los contaminantes excedía los límites máximos permitidos en la región. El sistema se basó en la plataforma Arduino y para la medición de partículas



contaminantes del aire se utilizó un SBC modelo SHINYEI PPD42NS, además de un DHT22 para medir temperatura y humedad, así también sensores MQ para medir gases como CO y CO<sub>2</sub>. Para confirmar la confiabilidad del dispositivo, realizaron análisis comparativos de las concentraciones de partículas, colocando el dispositivo en el mismo punto que un equipo de referencia por un periodo de dos meses. El análisis estadístico de los datos basado en regresión lineal tuvo un coeficiente de determinación, R<sup>2</sup>, de 0.8897. Además, este trabajo implementó un polinomio de tercer grado, para calcular la concentración de partículas. Muchas veces estas ecuaciones ya vienen integradas en una librería y por esto el dispositivo no calcula directamente la concentración, aun así, es necesario realizar una calibración del sensor con algún equipo de referencia.

En el estudio realizado por Velázquez y Cortés (2015) se realizó un monitoreo de partículas PM<sub>10</sub> en espacios de interés en DACBIOL-UJAT en la ciudad de Villahermosa, Tabasco. El monitoreo se realizó durante cuatro días consecutivos y con un equipo portátil, modelo 3M™ serie EVM. Se realizaron mediciones en cuatro puntos importantes, elegidos por estar en espacios representativos. Se monitoreó en laboratorio de biorremediación arrojó una mediana de (69 µg/m<sup>3</sup>, 32.7 µg/m<sup>3</sup>) en su día más alto. El cubículo 1 del edificio del edificio C con la mediana de (21 µg/m<sup>3</sup>, 33 µg/m<sup>3</sup>) en su día más alto. La oficina de servicios escolares arrojó una mediana de (33 µg/m<sup>3</sup>, 7.1 µg/m<sup>3</sup>) en su día más alto. Con estos datos, se estableció a través de modelos matemáticos y uso de software 3D, se llega a la conclusión que la calidad del aire es afectada por exposición a PM<sub>10</sub>, lo cual puede traer efectos nocivos a la salud y al medio ambiente, pero cabe mencionar que un área no siempre permanece con las mismas concentraciones, estas varían por los distintos factores, como las actividades realizadas en el sitio, cambios en el ambiente (como la temperatura y la humedad relativa) y la re-suspensión por la dirección del aire.

El informe realizado por Vital Strategies (2022) resaltó la importancia de los sensores de bajo costo (SBC), como complemento del monitoreo ambiental, sobre todo en situaciones donde el presupuesto es ajustado. Por ejemplo, los SBC incrementaron



el área de estudio ya que, con el mismo coste de un sensor de referencia, permite mantener operando más equipos. La revisión de distintos casos de estudio en diversas regiones de Latinoamérica y Asia que fueron llevadas a cabo demostró que estos sensores tienen un margen mínimo de error, en mediciones de PM<sub>2.5</sub>, al compararlos con los sensores de referencia. También enfatizaron la importancia de establecer un protocolo de calibración, para la integración de los datos de SBC, a través de correcciones basadas en modelos matemáticos.

Algunos investigadores recomiendan la inclusión de SBC. Como el caso de Buitrago Mesa y Rodríguez Rodríguez (2022) donde integraron SBC al monitoreo de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Colombia. Estos autores lo consideran una alternativa más accesible en comparación a las costosas estaciones de referencias, por lo que han adoptado en los últimos años. Otra ventaja de los SBC destacada es que permiten ampliar el monitoreo, sin importar si son zonas rurales o urbanas. La implementación de los sensores SDS011 y el PMS5003, fueron exitosas en la red ciudadana de monitoreo y proyectos académicos. Acompañado de protocolos de calibración, para aumentar la fiabilidad de los datos y rentabilidad del monitoreo ambiental.

Estudios actuales como las de Jiayang He. et. al. (2024) durante la temporada de incendios de la ciudad de Seattle en 2020, se evaluó el uso de la red de SBC para el monitoreo de exposición en población local a PM<sub>2.5</sub>, en interiores y exteriores. Los resultados obtenidos por los sensores exteriores arrojaron una alta correlación ( $R^2$  de 0.94) tras calibrarse con estaciones de referencia. El estudio implemento una red integrada por sensores Plantower PMS A003, para el monitoreo fijo en siete ubicaciones urbanas, en residencia y oficinas, con la implementación de GPS se realizaron monitoreos personales, con ublox SAM-M8Q. Estos últimos demostraron variabilidad de los datos, a exposición en microambientes, demostrando que no puede estimarse solo con datos fijos. Demostraron que la red es útil y estable, aunque depende de correcciones por humedad y calibraciones específicas para eventos extraordinarios, como incendios.



La evidencia recopilada por A. Z. Orrego (2022) expone los avances y mejoras continuas de la integración de los SBC a una red de calidad del aire en Colombia. Su trabajo enfatizó el uso de esta tecnología innovadora sumada a estaciones de referencia, para aumentar la densidad de una red de medición, creciendo así la cobertura espacial del monitoreo. El autor destacó la importancia del desarrollo de sistemas de pronósticos en modelación meteorológica y la dispersión de contaminantes, acompañada de protocolos para la detección temprana de emisiones y colaboración entre autoridades ambientales, instituciones científicas y el público en general, para la correcta gestión de la calidad del aire a través de los SBC. Este trabajo menciona estrategias integradas, sobre el monitoreo ambiental, incentivando la investigación de sistemas de alerta temprana y la mejora de las redes actuales a través de las nuevas tecnologías, como es el caso de los SBC.

De acuerdo con lo expuesto por Flores Cortez et al. (2022) se desarrolló un sistema de internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), de bajo costo, para el monitoreo de la calidad del aire, en El Salvador. Utilizando sensores para la medición de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, conectados a una plataforma en línea además de la implementación de microcontroladores, donde se usó la tarjeta ESP32 y LaRoWAN (tecnología de bajo consumo para transmitir datos a largas distancias), para la transmisión de datos. El sistema arrojó una correlación aceptable de  $R^2 = 0.7$ , con equipos de referencia, después de la aplicación de algoritmos de corrección. La importancia de este trabajo es que presenta una metodología replicable si no se cuenta con los recursos o la infraestructura necesarios para un monitoreo con equipos de referencia, brindando una alternativa para el uso del monitoreo ambiental.

Existen manuales metodológicos para el correcto empleo de los SBC. Por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, publica un manual que establece un protocolo estandarización para la correcta valoración de SBC, operando simultáneamente junto a estaciones de referencia. También establece la metodología para la instalación de sensores en estaciones



reguladas, con criterios de distancia, altura y condiciones ambientales. Se enfatiza especialmente los periodos de monitoreo, donde se consideran variables como la humedad, la temperatura, concentraciones de contaminantes (como  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ ), además de suministrar plantillas de análisis estadístico de sesgos y precisión (EPA, 2022).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México



## 7. Marco Teórico

### 7.1 Material Particulado

El Material Particulado (PM, por sus siglas en inglés) está compuesto por una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas, en estado sólido y líquido, estas permanecen suspendidas en el aire que respiramos (EPA, 2025). Dichas partículas son aerodinámicas, gracias a que tienen la capacidad de re-suspenderse en el ambiente dependiendo de su tamaño, teniendo gran impacto en el medio ambiente y la salud pública (Yin et al., 2020).

El PM se clasifica de acuerdo con el diámetro de la partícula sea PM<sub>2.5</sub> o PM<sub>10</sub>. Se describen brevemente:

- Partículas finas (PM<sub>2.5</sub>). Son aquellas partículas con un diámetro igual o menor a 2.5 micrómetros, estas son peligrosas debido a que tiene la capacidad de penetrar el tracto respiratorio y llegar a los alvéolos pulmonares (Cohen et al., 2017).
- Partículas gruesas (PM<sub>10</sub>). Son partículas con un diámetro menor a 10 micrómetros, estas partículas también afectan la salud, aunque tienden a depositarse en las vías respiratorias superiores (Gakidou E. et al., 2017).

Debido a su pequeño tamaño, las partículas finas tienen la capacidad de ingresar al torrente sanguíneo, teniendo la capacidad de alcanzar diversos órganos y causar daños graves, como problemas cardiovasculares y respiratorios (Zivanov et al., 2018).

### 7.2 Efectos a la Salud del Material Particulado

La contaminación por partículas suspendidas en el ambiente es un tema de gran relevancia en pleno siglo XXI, gracias a su relación con el medio ambiente. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, por sus siglas en español), alrededor del 99% de la población mundial, se encuentra expuesta a aire que supera los límites recomendados (World Health Organization, 2024). Algunas afecciones relacionadas a la exposición prolongada a el material particulado son: efectos negativos a las funciones



cognitivas, esterilidad, enfermedades cardiovasculares, antracosis en vías respiratorias, asma, entre otras afecciones pulmonares.

La relevancia del material particulado radica en su capacidad para penetrar el sistema respiratorio, dependiendo de su tamaño y propiedades aerodinámicas. Las partículas más finas (PM<sub>2.5</sub>) representan un mayor riesgo, ya que pueden atravesar las barreras pulmonares, el sistema sanguíneo y causar daños sistémicos, afectando órganos vitales (Zivanov et al., 2018; Cohen et al., 2017). Un factor cambiante para posibles efectos al cuerpo humano, son el sexo y la edad, así también personas hipertensas, diabéticas y alérgicas.

En México los límites para concentraciones de partículas, se establecen las normas oficiales mexicanas (NOM). De acuerdo con la NOM-025-SSA1-2021, la exposición aguda, son concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, mayores a 75 y 45 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Por considerarse exposición crónica, para PM<sub>10</sub> debe ser mayor a 40 µg/m<sup>3</sup> y para PM<sub>2.5</sub> debe de ser mayor a 12 µg/m<sup>3</sup>. En comparación con los parámetros establecidos por la OMS, como se muestra en la Tabla 1, los límites máximos permitidos de la normatividad mexicana se sobrepasan considerablemente. Por lo tanto, aunque el área puede considerarse dentro de los parámetros de la norma, aún representa un riesgo para la salud comparándolo con las recomendaciones emitidas por la OMS.

**Tabla 1**

*Límites Para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Concentraciones de 24 H y Anuales*

**Nota:** Datos ajustados al cumplimiento gradual (año 3°) de la NOM-025-SSA1-2021.

**Fuente:** NOM-025-SSA1-2021; World Health Organization, 2021.

Contaminante	Concentración	LMP (µg/m <sup>3</sup> )	
		OMS	NOM-025-SSA1-2021
PM <sub>2.5</sub>	Anual	5	10
	24 H	15 (no exceder más de 3 a 4 veces al año)	33
PM <sub>10</sub>	Anual	15	28
	24 H	45	60



### 7.3 Principales Fuentes de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$

El material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , son contaminantes atmosféricos clasificados como de gran relevancia en la salud pública, estos provienen de diversas fuentes que contribuyen a su presencia en el aire (Gonzales Lavado et al., 2023). Las fuentes móviles son principalmente el tráfico vehicular y la re-suspensión de polvo en carreteras, estas representan una gran fuente, a causa de la generación constante de partículas por combustión y fricción.

Por otro lado, las fuentes fijas como actividades industriales y la quema de combustibles fósiles liberan grandes cantidades de  $PM_{10}$  a través de procesos productivos y emisiones relacionadas al sector energético. Las fuentes naturales, incluyendo la erosión del suelo y el material mineral dispersado por el viento, también aportan partículas, especialmente en regiones áridas o expuestas (Gavilanes Gavilánez, 2019). Las zonas metropolitanas se distinguen por tener una alta densidad poblacional, para consecuencia un alto uso de vehículos. Al haber una cantidad alta de vehículos, el tránsito vehicular se vuelve más lento, en consecuencia, se genera mayor cantidad de material particulado, derivado de la deficiencia en la combustión interna de cada vehículo (World Health Organization, 2021).

### 7.4 Factores que Afectan la Medición de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$

La humedad relativa (HR) es de gran relevancia a la hora de realizar el monitoreo. La humedad indica el contenido de vapor de agua en el aire, la cual medimos en porcentaje. La humedad puede aumentar o disminuir el tamaño de la partícula, en especial las de origen antropogénico, estas son llamadas higroscópicas. Esto permite estimar cual será el diámetro de la partícula predominante, ya sea  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{1.0}$  (Granados-Muñoz et al., 2015; Sánchez Paico y Bautista Monsalve, 2017). Es importante considerar las condiciones climáticas ya que las partículas se comportarán con forme a ellas.



La temperatura es una propiedad física que tiene la capacidad de afectar la densidad del aire y la estabilidad atmosférica, esto determina si la dispersión de las partículas en el ambiente es estable o no. Debe considerarse la temperatura de operación del equipo de medición la cual es -10 a 60 °C (Ophir Photonics, 2013; Sánchez Paico y Bautista Monsalve, 2017). Por otro lado, la aerodinámica de una partícula, establece si estas persisten mayor tiempo suspendidas en el ambiente y son transportadas a mayores distancias, con escenarios como condiciones atmosféricas, velocidad y dirección del viento (World Health Organization, 2021). Se ha demostrado a través de múltiples estudios que, las partículas esféricas y las no esféricas tiene coeficientes de arrastres diferentes, esto influye directamente a su persistencia en el ambiente (Bagheri y Bonadonna, 2016).

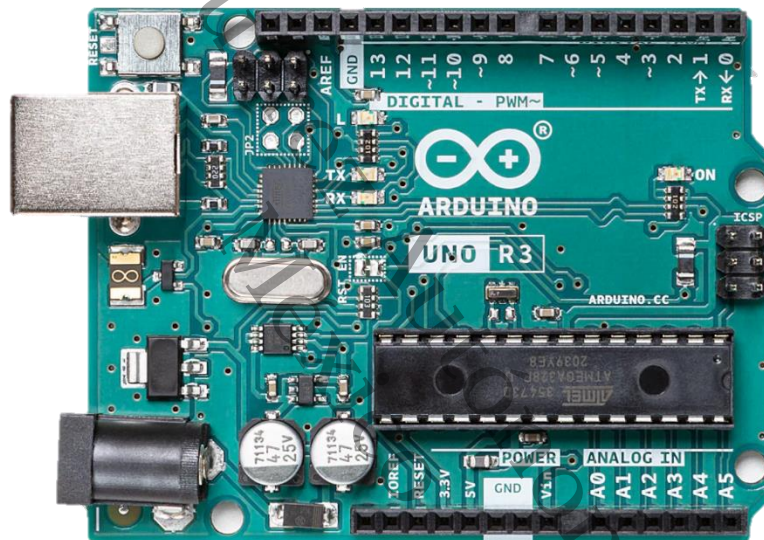
### **7.5 Calibración y Validación de Sensores de Bajo Costo**

La calibración de los sensores de bajo costo con equipo que utilizan métodos de referencia o equivalente aprobados mejora las mediciones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, en especial en zonas de alto tránsito vehicular. Se busca integrar SBC a las redes de monitoreo donde se considera la variabilidad climática, dando una solución con modelos matemáticos para calibrar los dispositivos.

La calibración de SBC para el monitoreo de PM tiene un enfoque estadístico, para asegurar la confiabilidad de los datos. En la ciudad de Bogotá, Colombia se usaron modelos de regresión lineal para reducir el error, en mediciones de PM con un sensor óptico PMS5003, comparados con la estación de referencia y considerando factores como: temperatura y la humedad (Gallego, 2022). Se ha demostrado que los datos de los monitoreos con SBC, debidamente calibrados con sensores de referencia, se utilizan para proyectos académicos donde se miden PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, para análisis epidemiológicos, considerando el ajuste de variables meteorológicas y la posible distancia de vías de tránsito vehicular (Jianzhao Bi. et al., 2021).

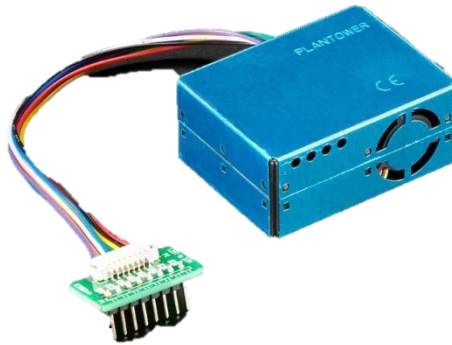
## 7.6 Arduino y Sensores de Bajo Costo

Arduino uno es una placa que integra un microcontrolador con lenguaje C/C+. Cumple funciones como, proyectos de educación, investigación y monitoreo ambiental (Pawel et al., 2022). Trabaja a 5 V y es compatible con diferentes componentes electrónicos como: sensores, actuadores, módulos y pantallas, además de contar con una entrada serie para conectar a la computadora, la cual se utiliza para su programación (Arduino, 2025). Es de importante mencionar que existen una gran cantidad de librerías, tutoriales y códigos de uso abierto, que facilitan el aprendizaje de Arduino (Figura 1).



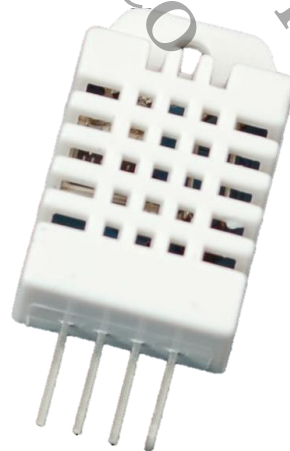
**Figura 1**  
Placa Arduino Uno  
Fuente: (Arduino, 2025).

El sensor PMS5003, se integra fácilmente con Arduino debido a su interfaz UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) y a su consumo eléctrico de 5 V (Figura 2). Arduino trabaja con este tipo de interfaz serial asincrónico (es una forma de transmitir y recibir datos, entre componentes electrónicos). El sensor tiene la capacidad de medir partículas  $PM_{1.0}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ . Su principio de medición se basa en que las partículas del aire dispersan la luz infrarroja. El sensor emite un láser que ilumina las partículas en el ambiente. La luz dispersada es captada por un fotodiodo. La concentración se mide interpretando la intensidad de la dispersión bajo el algoritmo de Mie (Adafruit, 2017).



**Figura 2**  
Sensor PMS5003.  
Fuente: (Adafruit, 2017).

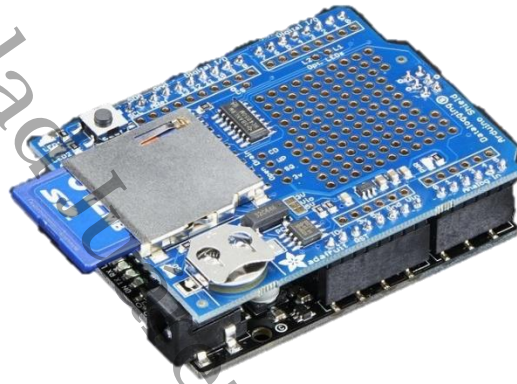
El sensor digital DHT22, es un componente con la capacidad de medir la temperatura (en °C) y la humedad relativa del aire (Figura 3). Debido a su baja demanda energética, es compatible para trabajar con Arduino. Este modelo es sensible a los cambios del ambiente lo que hace muy preciso. Su uso es intuitivo y pragmático, gracias a que cuenta con tres pines de alimentación: positivo (VCC), negativo (GND) y un pin digital (DATA) (Adafruit, 2025).



**Figura 3**  
Sensor DHT22.  
Fuente: (Adafruit, 2025).

El Shield Data Logger es una placa de expansión, montable sobre un Arduino uno. Cuenta con un reloj en tiempo real y un lector de tarjetas MicroSD (Figura 4). Su

instalación no requiere cableado y está diseñado para acoplarse a los pines originales de la placa Arduino uno (Earl, 2013). Puede almacenar archivos compatibles con Excel, R Studio o Python, además de guardar estos archivos con fecha y hora, con el uso de librerías disponibles dentro de la plataforma Arduino IDE.



**Figura 4**  
*Shield Data Logger.*  
*Fuente: (Earl, 2013).*

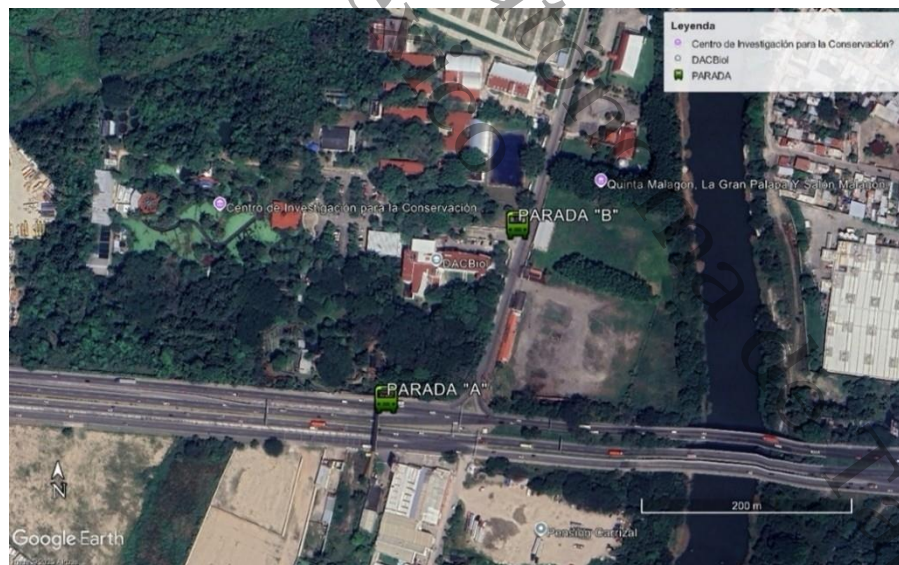
La pantalla LCD 20x4 es un módulo electrónico de bajo costo ampliamente utilizado en sistemas embebidos para visualizar datos en cuatro filas de 20 caracteres cada una (Figura 5). Su interfaz es compatible con protocolos de conexión como I2C o SPI, esto facilita su integración con microcontroladores (Arduino Uno), mientras que su bajo consumo energético (<5 V) lo hace ideal para proyecto IoT de monitoreo ambiental (Vishay Intertechnology, Inc., 2012).



## 8. Metodología

### 8.1 Área de Estudio

Este trabajo se desarrolló en el campus DACBIOL. Esta División se ubica en el kilómetro 0.5 de la carretera Villahermosa-Cárdenas y sus coordenadas geográficas son: latitud 17.989801° y longitud -92.975054 (Figura 6). Aquí se ubican dos paradas, una para el transporte local y otra para el transporte foráneo. El trabajo se realizó en ambos puntos. La parada local está sobre la carretera a Bosques de Saloya y aquí se concentran estudiantes que se desplazan a distintos locales en Villahermosa, colonias cercanas o la central de autobuses para trasladarse a sus hogares. La parada foránea está ubicada sobre la carretera federal Villahermosa-Cárdenas y aquí se concentran estudiantes y otras personas que van a los municipios de Cárdenas, Cunduacán, Huimanguillo, Reforma, Chiapas o algún otro punto.



**Figura 6**  
**Área de Estudio**

**Nota:** Los Marcadores Muestran las Ubicaciones de Ambas Paradas de Transporte Público Local (B) y Foráneo (A), Frente a DACBIOL y en la Carretera Villahermosa-Cárdenas.

**Fuente:** Imagen satelita de Google Heart, modificada por el autor, 2025.



## 8.2 Desarrollo del Dispositivo

La Tabla 2 muestra los componentes del dispositivo de bajo costo (DBC) que se desarrolló para el monitoreo de partículas PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, humedad relativa (HR) y temperatura del aire (Ta) ambiente (desde ahora, parámetros ambientales). El DBC se desarrolló con Arduino Uno, un sensor de partículas PMS5003 y un sensor de humedad modelos DHT22. Para que sea portátil el DBC se alimentó con un power bank y se dotó de un sistema de adquisición de datos mediante un escudo Data Logger compatible con la placa Arduino Uno. La Tabla 3 muestra el rango de operación de los sensores utilizados. Por ejemplo, el rango de mediciones de temperatura del DHT22 es suficientemente amplio para registrar la temperatura ambiente del aire aquí en Villahermosa, de acuerdo con los datos disponibles en el boletín informativo del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) de Villahermosa consultado en línea (<https://tabasco.gob.mx/seiacc-calidad-del-aire-2024>), la temperatura promedio es de 24 °C, siendo mayo el mes más con una media máxima de 34 °C.

**Tabla 2**

*Costo de Componentes del Dispositivo*

Unidades	Componentes	Costo unitario
Fuente de alimentación	Power Bank	\$ 200
Sensor 1	DHT22	\$ 69
Sensor 2	PMS5003	\$ 465
Unidad de control	Placa Arduino Uno	\$ 200
Pantalla	LCD 20x4 con I2C	\$ 132
Unidad de almacenamiento de datos	Shield Data Logger	\$ 99
Unidad de salida	Memoria microSD	\$ 99
Soporte	Tripee metálico	\$ 530
Carcasa	Caja metálica	\$100

**Fuente:** Adquisición mediante compra en línea Mercado Libre.

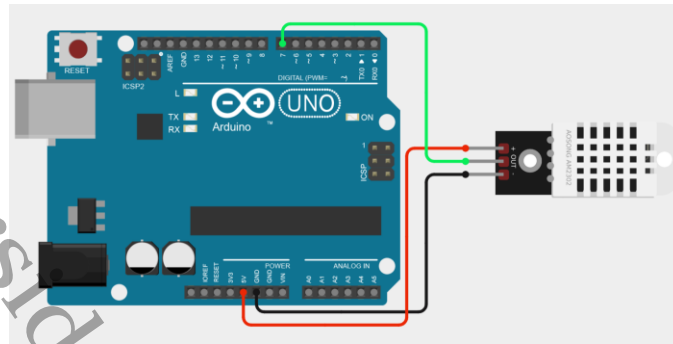
**Tabla 3.****Parámetros de Operación de los Sensores de Temperatura, Humedad y Partículas**

Sensor	Parámetro	Rango de medición	Precisión
PMS5003	PM <sub>10</sub>	0 – 999.9	± 10 µg/m <sup>3</sup> (0 – 100 µg/m <sup>3</sup> ) o ± 10 % (> 100 µg/m <sup>3</sup> )
	PM <sub>2.5</sub>	0 – 999.9	± 10 µg/m <sup>3</sup> (0 – 100 µg/m <sup>3</sup> ) o ± 10 % (> 100 µg/m <sup>3</sup> )
DHT22	Humedad	0 - 100 % HR	± 2 – 5 % HR
	Temperatura	- 40 a + 80 °C	± 0.5 °C

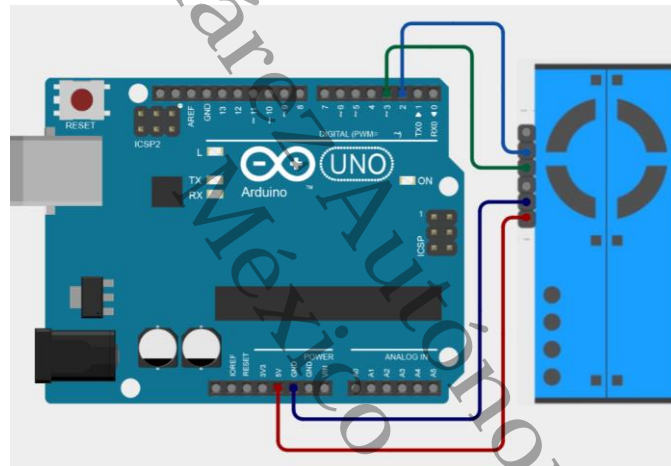
**Fuente:** (Adafruit, 2017; Adafruit, 2025).

Para el desarrollo del DBC, primero se llevó a cabo una investigación bibliográfica del diagrama de electrónico de cada componente y su programación básica, pero en concreto con mayor profundidad del sensor de partículas, ya que en el laboratorio de Calidad del Aire y Desarrollo Tecnológico cuenta con experiencia en la programación de sensores como el DHT22 y Arduino Uno.

Todos los diagramas electrónicos por cada componente del dispositivo desarrollado se diseñaron en línea con *Circuit Designer*, un software para el diseño electrónico disponible en <https://www.circuitstudio.com>. No requiere un registro forzoso, pero es recomendable hacerlo para guardar el diseño y editarlo las veces que sea necesario. La Figura 7 muestra el diagrama electrónico del sensor de temperatura y humedad DHT22 diseñado en *Circuit Designer*. La Figura 8 muestra la conexión electrónica entre el sensor PMS5003 con la placa Arduino. La Figura 9 muestra el diagrama de conexión electrónico, entre la pantalla LCD 20x4 (con I2C ya integrado) y la placa Arduino Uno.

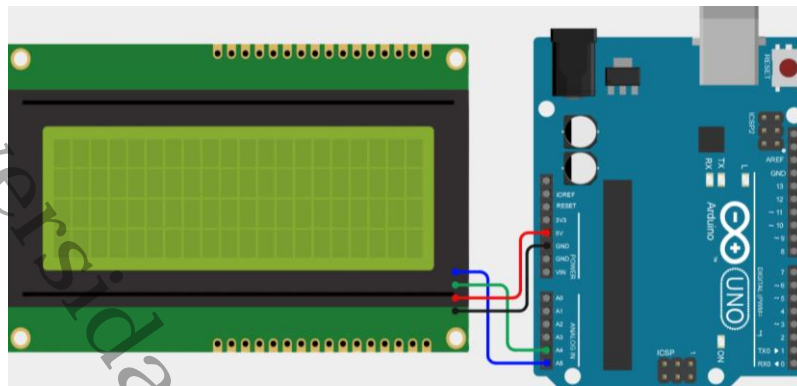


**Figura 7**  
*Diagrama Electrónico Para la Interconexión del Sensor DHT22 a Arduino Uno.*  
*Fuente: Diseño propio en Cirkuit Designer.*



**Figura 8**  
*Diagrama Electrónico Para la Interconexión del Sensor PMS5003 a Arduino Uno.*  
*Fuente: Diseño propio en Cirkuit Designer.*

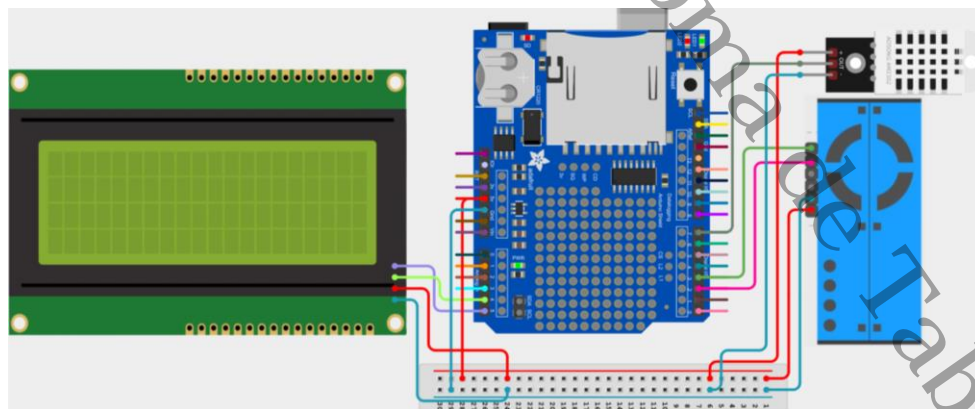
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.



**Figura 9**  
*Diagrama Electrónico Para la Interconexión de Pantalla LCD 20x4 con I2C a Arduino Uno.*

**Fuente:** *Diseño propio en Cirkuit Designer.*

No se muestra ningún diagrama de conexión electrónica entre el Shield Data Logger y la placa Arduino ya que su instalación solo requiere superponerlo a la placa Arduino. La Figura 10 muestra el diagrama de conexión electrónico completo, donde están integrados todos los componentes electrónicos ya mencionados, de tal forma que pueda trabajar entre sí, sin causar interferencias entre ellos.



**Figura 10**  
*Diagrama Electrónico Para la Interconexión, de Todos los Componentes Electrónicos Integrados al Prototipo Final.*

**Fuente:** *Diseño propio en Cirkuit Designer.*



Para una mejor comprensión del montaje del dispositivo se presenta la Tabla 4 en esta se observa la conexión de cada componente electrónico hacia la placa Arduino Uno. Es importante tener la conexión como lo indica la tabla, ya que esta se señaló en la programación del equipo.

**Tabla 4**

*Tabla de Conexiones, Entre Arduino Uno y los Componentes Electrónicos.*

Sensor/módulo	Pin del sensor/módulo	Pin de Arduino Uno
DHT22	OUT	7
	POSITIVO	5V
	NEGATIVO	GND
PMS5003	TXD	2
	RXD	3
	5V	5V
	GND	GND
	LCD 20X4 I2C	SDA
	SCL	A5
	5V	5V
	GND	GND

**Nota:** Conexión necesaria para funcionamiento adecuado del dispositivo.

**Fuente:** Conexión propia.

La programación del DBC controla la toma de lecturas de los sensores y los registros y adquisiciones de datos. La escritura del código se realizó con el software libre *Arduino IDE*. Este software está disponible en la versión escritorio y en línea en la página de Arduino-home (<http://www.arduino.cc/>) en la pestaña products. La programación integró el registro y aseguramiento de los datos y la frecuencia de monitoreo de un minuto.

### 8.3 Calibración de DBC

La calibración del sensor de partículas con el equipo de referencia estuvo fuera del alcance de este proyecto. Pero se llevó a cabo una calibración sencilla con un monitor de calidad del aire marca Temtop. Este monitor mide las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en µg/m<sup>3</sup>. Las lecturas deberán tomarse de manera manual cada minuto debido a que no cuenta con sistema de registro de datos o Data Logger. La calibración se realizó para cada punto de medición y una vez que se tuvieron los datos se procedió a realizar una



curva de calibración entre las concentraciones de PM<sub>monitor</sub> vs PM<sub>sensor</sub>. Las mediciones con el sensor tuvieron alta compatibilidad a las del monitor de datos, estas siguieron una tendencia lineal con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> mayor a 0.5, estando muy cerca de la unidad. Este procedimiento preferentemente se implementó en R Studio, ya que permitió probar diferentes modelos de calibración de manera simultánea, de resúmenes matemáticos y de forma visual el valor R<sup>2</sup>.

#### 8.4 Programación Final del Dispositivo Desarrollado

Se desarrollaron dos versiones finales de código en Arduino IDE. Con la primera versión, el dispositivo guardó los datos tomados por los sensores en la tarjeta microSD (Tabla 5), pero no permite visualizar en la pantalla la información en tiempo real, esto con el fin de extender la batería del equipo. Con la segunda versión los datos se visualizaron en una pantalla LCD (Tabla 6). Los siguientes códigos se dividieron en cuatro partes importantes. La primera llama a las librerías que se utilizaron. La segunda declara las variables necesarias para ejecutar el código. La tercera da valor a las variables y realiza la calibración del sensor PMS5003. La cuarta repite indefinidamente la captura y escritura de la información.

**Tabla 5**

*Código para Guardar Información Recopilada por los Sensores, en Tiempo Real*

```
//Parte1. librerías
#include <SoftwareSerial.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <RTClib.h>

//Parte 2. Variables
#define ECHO_TO_SERIAL 1
#define KNT_MAX 68 //Se recibe flujo de datos aprox. una vez por segundo y se
promedian los valores KNT_MAX (180 muestras = aprox. 3 minutos)
#define DHTPIN 7
#define DHTTYPE DHT22
#define SDpin 10
RTC_DS1307 rtc; //RTC_PCF8523 rtc; // clock in new data loggers
```



```
int knt=0, yr, mon, dy, hr, mn, sec;
float pm1=0, pm25=0, pm10=0, AQI25, AQI10;
float p03=0, p05=0, p10=0, p25=0, p50=0, p100=0;
float PM10_A, PM25_A;
File logfile;

// Variable pms50003data y subvariables
struct pms5003data {
  uint16_t framelen;
  uint16_t pm10_standard, pm25_standard, pm100_standard;
  uint16_t pm10_env, pm25_env, pm100_env;
  uint16_t particles_03um, particles_05um, particles_10um;
  uint16_t particles_25um, particles_50um, particles_100um;
  uint16_t unused;
  uint16_t checksum;
};
pms5003data data;

SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Parte 3. Preparación del programa
void setup() {
  rtc.begin(); Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pmsSerial.begin(9600);
  if (!SD.begin(SDpin)) {
    Serial.println("Falla en el registro");
    delay(50);
    exit(0);}
  Serial.print(F("Inicializando tarjeta SD"));
  /*configura el pin10 para que se comporte como pin de salida*/
  pinMode(SDpin, OUTPUT);
  Serial.println("Registro iniciado");
  /*Pone fecha y hora de la computadora*/
  //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

  //Crea un archivo .csv
  logfile=SD.open("PM25_DHT.CSV", FILE_WRITE);
  logfile.print("date"); logfile.print(",");
  logfile.print("DHT_T"); logfile.print(",");
  logfile.print("DHT_HR"); logfile.print(",");
  logfile.print("PM1"); logfile.print(",");
  logfile.print("PM25"); logfile.print(",");
  logfile.print("PM10"); logfile.print(",");
```



```
logfile.print("PM25_A"); logfile.print(",");
logfile.println("PM10_A");
logfile.flush();
#if ECHO_TO_SERIAL
Serial.println("day hr:min:sec PM1 PM2.5 PM10");
#endif
}

// Parte 4. Ejecución del programa
void loop() {
  if (readPMSdata(&pmsSerial)) {
    pm1+=data.pm10_env; pm25+=data.pm25_env; pm10+=data.pm100_env;
    p03+=data.particles_03um; p05+=data.particles_05um;
    p10+=data.particles_10um; p25+=data.particles_25um;
    p50+=data.particles_50um; p100+=data.particles_100um;
    knt++;
    if (knt==KNT_MAX) {
      DateTime now=rtc.now();
      pm1/=knt; pm25/=knt; pm10/=knt; p03/=knt; p05/=knt; p10/=knt;
      p25/=knt; p50/=knt; p100/=knt;
      //LOCAL
      //PM10_A= -16.92528+1.21145*pm10;
      //PM25_A= 0.70605*pm25;
      //FORANEO
      PM10_A= 0.5139396*pm10 +0.0056377*(pm10*pm10);
      PM25_A= 0.5351817*pm25 +0.0018551*(pm25*pm25);
      String fecha_hora = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" +
String(now.year())+" "+String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" +
String(now.second());
      //Escritura en microSD*/
      logfile.print(fecha_hora); logfile.print(",");
      logfile.print(dht.readTemperature(),1); logfile.print(",");
      logfile.print(dht.readHumidity(),0); logfile.print(",");
      logfile.print(pm1,1); logfile.print(",");
      logfile.print(pm25,1);logfile.print(",");
      logfile.print(pm10,1); logfile.print(",");
      logfile.print(PM25_A,1); logfile.print(",");
      logfile.println(PM10_A,1);
      logfile.flush();
      #if ECHO_TO_SERIAL
      Serial.print(dy);Serial.print(' ');Serial.print(hr);Serial.print(':');
      Serial.print(mn);Serial.print(':');Serial.print(sec);Serial.print(' ');
      Serial.print(pm1,1);Serial.print(", ");Serial.print(PM25_A,1);
```



```
Serial.print(", ");Serial.print(PM10_A,1);Serial.println();
#endif
pm1=0; pm25=0; pm10=0; // reset PM
p03=0; p05=0; p10=0; p25=0; p50=0; p100=0; knt=0;
}
}
}

//Crea la función readPMSdata
boolean readPMSdata(Stream *s) {
if (! s->available()) { return false; } //se espera información del sensor
if (s->peek() != 0x42) { s->read(); return false; }
if (s->available() < 32) { return false; }
uint8_t buffer[32]; uint16_t sum = 0; s->readBytes(buffer, 32);
for (uint8_t i=0; i<30; i++) { sum += buffer[i]; }
uint16_t buffer_u16[15];
for (uint8_t i=0; i<15; i++) {
buffer_u16[i] = buffer[2 + i*2 + 1]; buffer_u16[i] += (buffer[2 + i*2] << 8); }
memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);
if (sum != data.checksum) { Serial.println("Checksum failure"); return false; }
return true;
}
```

**Nota:** Código funcional sin usar pantalla LCD.

**Fuente:** Programación propia en Arduino IDE.

**Tabla 6**

**Código de Exposición del Dispositivo**

```
// Parte 1. Librerías
#include <SoftwareSerial.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include <RTClib.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
//Variables
#define ECHO_TO_SERIAL 1
#define KNT_MAX 10 //Tiempo de actualización de datos
#define DHTPIN 7
#define DHTTYPE DHT22
#define SDpin 10
RTC_DS1307 rtc;
```



```
int knt=0, yr, mon, dy, hr, mn, sec;
float pm1=0, pm25=0, pm10=0, AQI25, AQI10;
float p03=0, p05=0, p10=0, p25=0, p50=0, p100=0;
File logfile;
// Parte 2. Variable pms5003data y subvariables
struct pms5003data {
  uint16_t framelen;
  uint16_t pm10_standard, pm25_standard, pm100_standard;
  uint16_t pm10_env; pm25_env, pm100_env;
  uint16_t particles_03um, particles_05um, particles_10um;
  uint16_t particles_25um, particles_50um, particles_100um;
  uint16_t unused;
  uint16_t checksum;
};
pms5003data data;
SoftwareSerial pmsSerial(2, 3);
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
// Parte 3. Preparación del programa
void setup() {
  rtc.begin(); Serial.begin(9600);
  dht.begin();
  pmsSerial.begin(9600);
  lcd.init();//Inicializar la LCD 20x4
  lcd.backlight();
  //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
}
// Parte 4. Ejecución del programa
void loop() {
  if (readPMSdata(&pmsSerial)) {
    pm1+=data.pm10_env; pm25+=data.pm25_env; pm10+=data.pm100_env;
    p03+=data.particles_03um; p05+=data.particles_05um;
    p10+=data.particles_10um; p25+=data.particles_25um;
    p50+=data.particles_50um; p100+=data.particles_100um;
    knt++;
    if (knt==KNT_MAX) {
      DateTime now=rtc.now();
      pm1/=knt; pm25/=knt; pm10/=knt; p03/=knt; p05/=knt; p10/=knt;
      p25/=knt; p50/=knt; p100/=knt;
      //LOCAL
      //PM10_A= -16.92528+1.21145*pm10;
      //PM25_A= 0.70605*pm25;
      //FORANEO
      PM10_A= 0.5139396*pm10 +0.0056377*(pm10*pm10);
      PM25_A= 0.5351817*pm25 +0.0018551*(pm25*pm25);
    }
  }
}
```



```
String fecha_hora = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" +  
String(now.year())+" "+String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" +  
String(now.second());  
String hora = String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" +  
String(now.second());  
  
//Escritura en pantalla  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("HORA: "); lcd.print(hora);  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("T: ");lcd.print(dht.readTemperature(),0); lcd.print(" °C");  
lcd.setCursor(10,1);  
lcd.print("HR: "); lcd.print(dht.readHumidity(),0); lcd.print(" %");  
lcd.setCursor(0,2);  
lcd.print("PM1: "); lcd.print("PM2.5: "); lcd.print("PM10: ");  
lcd.setCursor(0,3);  
lcd.print(pm1,1);  
lcd.setCursor(7,3);  
lcd.print(PM25_A,1);  
lcd.setCursor(15,3);  
lcd.print(PM10_A,1);  
  
pm1=0; pm25=0; pm10=0; // reset PM totals  
p03=0; p05=0; p10=0; p25=0; p50=0; p100=0; knt=0;  
}  
}  
}  
  
//Crea la función readPMSdata  
boolean readPMSdata(Stream *s) {  
if (! s->available()) { return false; }  
if (s->peek() != 0x42) { s->read(); return false; }  
if (s->available() < 32) { return false; }  
uint8_t buffer[32]; uint16_t sum = 0; s->readBytes(buffer, 32);  
for (uint8_t i=0; i<30; i++) { sum += buffer[i]; }  
uint16_t buffer_u16[15];  
for (uint8_t i=0; i<15; i++) {  
buffer_u16[i] = buffer[2 + i*2 + 1]; buffer_u16[i] += (buffer[2 + i*2] << 8); }  
memcpy((void *)&data, (void *)buffer_u16, 30);  
if (sum != data.checksum) { Serial.println("Checksum failure"); return false; }  
return true;  
}
```

**Nota:** Código funcional para bisualisar información en pantalla LCD.

**Fuente:** Programación propia en Arduino IDE.



### 8.5 Generación de Datos de Concentraciones de Partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Se realizaron campañas de medición de los parámetros ambientales en las dos paradas de autobuses durante el día con cierta duración, preferentemente antes de las cuatro de la tarde. La campaña abarcó varios días del mes de mayo y junio de 2025. Después de cada campaña, se descargaron los datos y se conformó una base de datos en Excel que indicó su respectiva fecha y hora de registro. La estructura de la base de datos fue de formato largo. Un ejemplo de este se muestra en la Tabla 7. Este formato es compatible con el software libre R. En este formato los datos faltantes se indicaron con las letras NA el cual es un tipo de nomenclatura que R procesó y detectó como dato no disponible. Las unidades de las variables fueron: °C, % y µg/m<sup>3</sup>, para la temperatura (Temp), humedad (HR) y concentración de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, respectivamente. La letra final en PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, T y S, indica que dato correspondió al equipo Temtop y al sensor respectivamente.

**Tabla 7**  
*Estructura de la Base de Datos en Excel.*

Fecha_hora	DHT22		Temtop		PMS5003	
	Temp_S	HR_S	PM10_T	PM25_T	PM10_S	PM25_S
23/10/2024 14:49:00	25	70	NA	NA	NA	NA
23/10/2024 14:50:00	25	70	NA	NA	NA	NA

**Fuente:** Fuente propia.

### 8.6 Análisis Estadístico de los Datos

Los datos se analizaron estadísticamente con R. El análisis consistió en resúmenes estadísticos de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Ta, HR para ambas paradas de transporte. Los datos del monitor Temtop se utilizaron no solo para calibrar el sensor también se aprovecharon para establecer valores de fondo en ambas paradas.



La técnica aplicada para sincronizar con variaciones de tiempo reducidas, entre el Temtop con el dispositivo, fue la siguiente: se cronometra al momento de conectar el dispositivo con la fuente poder, al transcurrir un minuto se tomó una foto a la pantalla del monitor Temtop, esto durante cada minuto en una hora. Una vez conseguido en periodos minútales, los datos del sensor PMS5003 y el Temtop, fueron sincronizados en una base de datos en Excel, con el fin de comparar ambos valores (solo  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), como se muestra en la Tabla 7.

Finalmente, se realizaron gráficos comparativos, especialmente de cajas para visualizar diferentes concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  entre paradas y se obtuvieron intervalos de confianza de 95% para la concentración de partículas, temperatura y humedad.

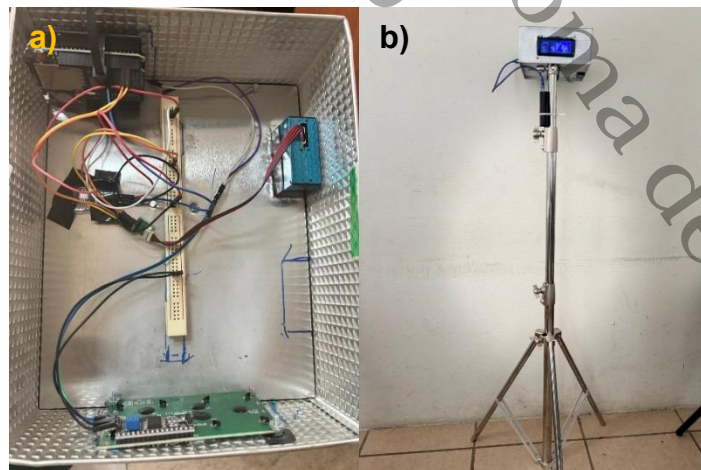
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México

## 9. Resultados

### 9.1 Desarrollo de Dispositivo Electrónico de Bajo Costo

La Figura 11 muestra el hardware del dispositivo electrónico prototipo (a), ya acondicionado en una caja metálica y encima de un tripié para su empleo en modo portátil (b). Esta modalidad no requirió que el dispositivo estuviera conectado a un contacto eléctrico, aunque esto es posible con un eliminador de corriente, si no que su fuente de alimentación fue un power bank, típico de los teléfonos celulares. Los sensores (PMS5003 y DHT22) se colocaron por debajo de la carcasa, de modo que no hay riesgo que se estropeen por lluvia de baja intensidad. El dispositivo tiene dos principales ventajas ante el sensor de referencia Temtop: su bajo costo y un sistema de registro de datos cada minuto.

En la Figura 12 se observa el dispositivo desarrollado en práctica de monitoreo, midiendo concentraciones de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , temperatura y humedad relativa. A un lado de este se encuentra el monitor de referencia Temtop, recolectando datos para la calibración del dispositivo.



**Figura 11**

*Diseño y Montaje Final del Dispositivo Desarrollado*

*Nota: a) Parte interna del dispositivo desarrollado; b) Dispositivo en modalidad portátil.*

*Fuente: Imagen propia.*

**Figura 12**

*Prototipo vs Temtop en Parada Foránea y Local*

*Nota: a) Etapa de calibración en parada foránea; b) Etapa de calibración en parada local.*

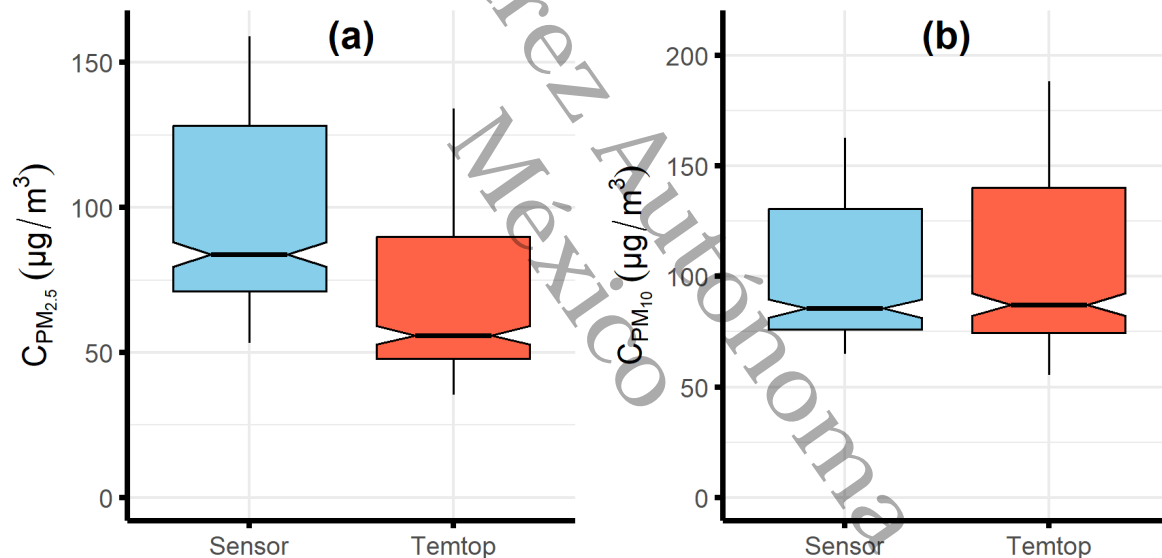
*Fuente: Imagen propia.*

## 9.2 Generación de Datos Para Calibración del Dispositivo

Los siguientes resultados se obtuvieron a partir de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, temperatura y humedad en las dos paradas de transporte en las inmediaciones de la DACBIOL, durante el periodo de monitoreo comprendido entre 1 de mayo del 2025 y 23 de mayo del 2025. En total se recopilaron 1,211 registros de concentraciones minútales medidas con el dispositivo y el Temtop en la paradas local y foránea de transporte escolar.

Las Figuras 13 y 14 comparan los comportamientos de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en las paradas local y foránea durante el periodo de calibración del dispositivo. Esta comparación mostró que las concentraciones de partículas fueron más variables en la parada foránea que en la parada local. Por ejemplo, la parada local la desviación estándar para PM<sub>10</sub> fue de 30.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con el dispositivo y de 37.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con el Temtop mientras que en la parada foránea fueron menores e iguales a 22.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 32.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. En lo que respecta a las PM<sub>2.5</sub> la desviación en la parada local fue de 32.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 24.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con el dispositivo y el monitor Temtop respectivamente; mientras que en la parada foránea fueron de 23.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 20.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

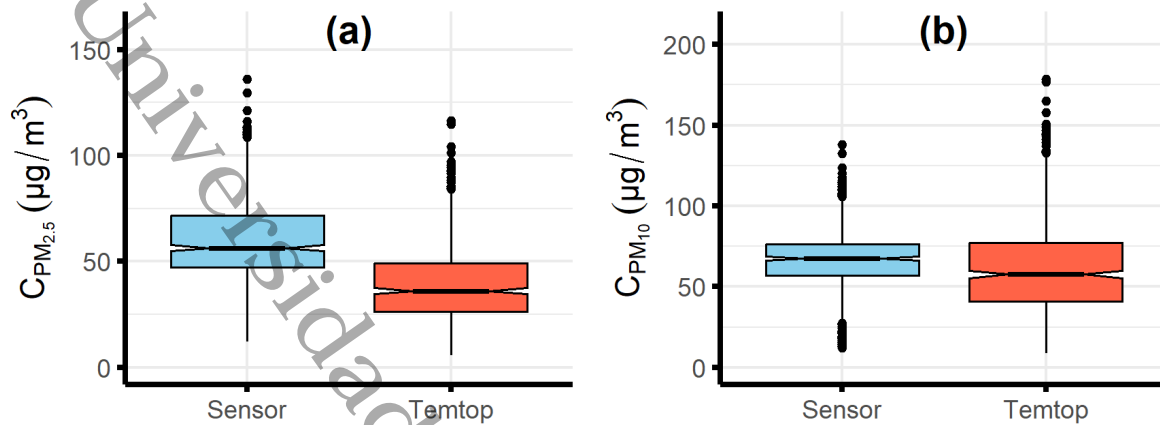
En términos generales y tomando como base el valor de la mediana, las mediciones de concentración con el dispositivo tendieron a ser mayores que las registradas con el monitor Temtop. La excepción fue para la concentración de  $PM_{10}$  en la parada local (Figura 13), donde el dispositivo tendió a subestimar la concentración midiendo  $79.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  contra  $82.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del Temtop. En la parada local la concentración de  $PM_{2.5}$  medida con el dispositivo fue de  $76.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y con el Temtop fue de  $52.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la parada foránea (Figura 14) la concentración mediana de  $PM_{2.5}$  fue de  $56.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $36.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en dispositivo y Temtop respectivamente; mientras que para  $PM_{10}$  fue de  $67.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $57.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.



**Figura 13**

Gráficas de Caja y Bigote, de Parada Local, Comparando Datos de Concentraciones  $PM_{2.5}$  vs Temtop.

Fuente: Elaboración propia en R.



**Figura 14**  
 Gráficas de Caja y Bigote, de Parada Foránea, Comparando Datos de Concentraciones PMS5003 vs Temtop  
 Fuente: Elaboración propia en R.

### 9.3 Curvas de Calibración del Dispositivo con Monitor de Referencia

La Tabla 8 contiene una lista de los modelos de calibración que se ajustaron para las partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, en la parada local. En las ecuaciones de esta tabla,  $pm10_{cal}$  y  $pm2.5_{cal}$  son los valores de concentración de partículas PM<sub>10</sub> o PM<sub>2.5</sub> corregidos, mientras que  $pm10_{sen}$  y  $pm2.5_{sen}$  son los valores que mide directamente el sensor PMS5003 que está integrado al dispositivo. Dichos modelos probados no solo dependen de la concentración medida por el sensor, también consideran la humedad relativa y la temperatura del aire.

**Tabla 8**  
 Curvas de Calibración para la Parada Local

No.	R <sup>2</sup>	Curva de calibración
1*	0.99	$pm2.5_{cal} = 0.70605 * pm2.5_{sen}$
2	0.94	$pm2.5_{cal} = -22.291665 + 0.696889 * pm2.5_{sen} + 0.402480 * HR$
3	0.94	$pm2.5_{cal} = 41.060369 + 0.715228 * pm2.5_{sen} - 1.123762 * T$
4	0.46	$pm2.5_{cal} = -1038.3461 + 18.6849 * T + 7.0754 * HR$
5	0.99	$pm10_{cal} = 1.054517 * pm10_{sen}$
6*	0.92	$pm10_{cal} = -16.92528 + 1.21145 * pm10_{sen}$
7	0.94	$pm10_{cal} = -226.76796 + 1.12195 * pm10_{sen} + 3.39398 * T + 1.60393 * HR$
8	0.46	$pm10_{cal} = -1607.9564 + 28.8984 * T + 10.9966 * HR$

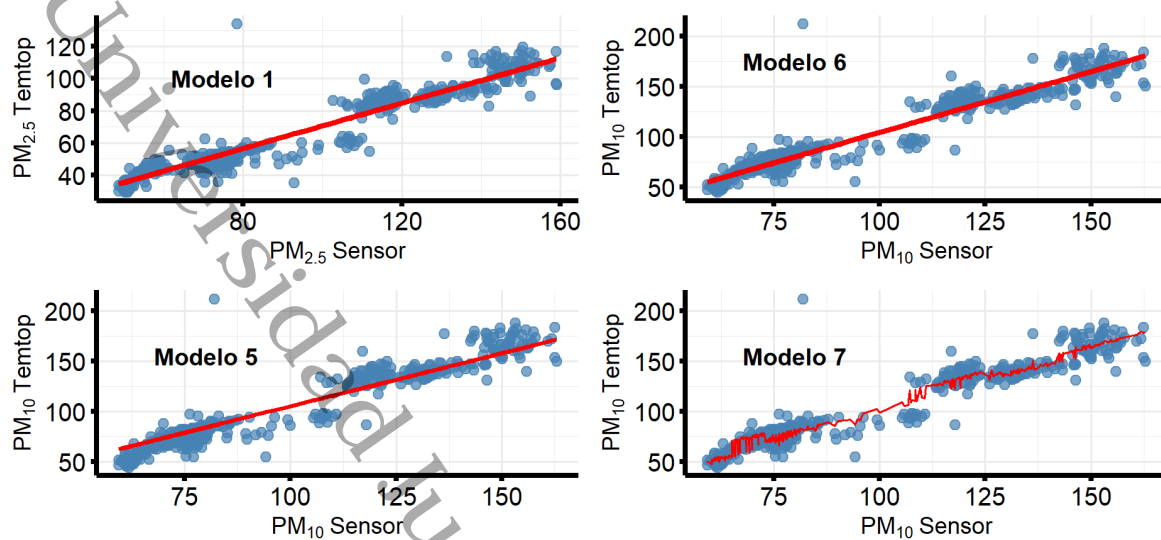
**Nota:** Los modelos marcados (\*) son los aplicados al sensor PMS5003, para las lecturas de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la parada local.

**Fuente:** Elaboración propia con base de datos del periodo de calibración.



De acuerdo con la Tabla 8 la mejor curva de calibración de  $PM_{2.5}$  en parada local fue el Modelo 1 con  $R^2$  de 0.99. Este modelo usa únicamente las medidas del sensor como variable correctora y es un modelo de línea recta sin ordenada al origen. El peor fue el Modelo 4, con un  $R^2$  de 0.46. Este es un modelo de regresión lineal múltiple que solo utiliza la T y HR como variables correctoras e indica que estas variables por si solas no son suficientes para tener una lectura calibrada del sensor. Para  $PM_{10}$  se eligió el Modelo 6, a pesar de que el Modelo 5 y el Modelo 7 tiene un coeficiente mayor a 0.92. La razón fue que, al comparar la curva de calibración con los datos observados, el Modelo 6 se ajusta mejor a los extremos de los valores observados, que el Modelo 5. El peor modelo fue el Modelo 8 y de nuevo fue un modelo de regresión lineal múltiple que utiliza solo T y HR como variables correctoras pero su  $R^2$  fue igual de 0.46.

La Figura 15 muestra los gráficos de dispersión de la concentración de partículas medidas por el monitor Temtop contra las concentraciones medidas por el dispositivo en la parada local. Las líneas de color rojo representan las curvas de calibración que se ajustaron a los datos observados. Para las  $PM_{2.5}$  la recta se corresponde con el modelo 1. Para las  $PM_{10}$  se presentan el Modelo 5, Modelo 6 y Modelo 7 para propósito de comparación. Puede notarse como el Modelo 6 se ajustó mejor a los extremos como ya se mencionó, que el Modelo 5. El Modelo 7 también muestra un buen ajuste, pero se prefirió el Modelo 6 por su simplicidad. La discontinuidad observada en ambos gráficos se debe a que el monitoreo no fue continuo, si no en periodos que duraron una hora entre las 8 am a 2 pm. Estos se eligieron por ser horarios de salida de estudiantes de la DACBIOL.



**Figura 15**

*Relación de Concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , Entre Temtop vs PMS5003, en Parada Local DACBIOL*

*Fuente: Elaboración propia en R.*

La Tabla 9 ahora contiene la lista de los modelos de calibración que se ajustaron para las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  pero, para la parada foránea. Para las  $PM_{2.5}$ , los mejores modelos fueron el Modelo 3 y el Modelo 5. Ambos modelos alcanzaron un  $R^2 = 0.97$ . El Moldeo 3 es el modelo de un polinomio de segundo orden donde la variable correctora es solo la concentración de partículas medidas por el sensor PMS5003; mientras que el Modelo 5 es un modelo de regresión lineal múltiple que utiliza la lectura de  $PM_{2.5}$  del PMS5003 y la lectura de temperatura del sensor DHT22. Al comparar los modelos 4 y 5 se puede notar que la temperatura es mejor variable predictora que la humedad relativa cuando el modelo es un plano que pasa por el origen (Modelo 5). El peor modelo de  $PM_{2.5}$  fue el Modelo 6 con un  $R^2$  de 0.23.

Con respecto a las  $PM_{10}$ , los mejores modelos fueron los modelos 9 y 11 con un  $R^2$  de 0.97. El moldeo 9 también es el modelo de un polinomio de segundo orden que solo utiliza las lecturas de  $PM_{10}$  del sensor como variable correctora de las lecturas. El moldeo 11 es parecido al modelo 5 de las  $PM_{2.5}$  por ende utiliza las lecturas de  $PM_{10}$  del sensor y de la temperatura del DHT22 como variables correctoras. Para las  $PM_{10}$  el peor modelo fue el modelo 12 basado solo en la temperatura y la humedad con un  $R^2$  de 0.24.



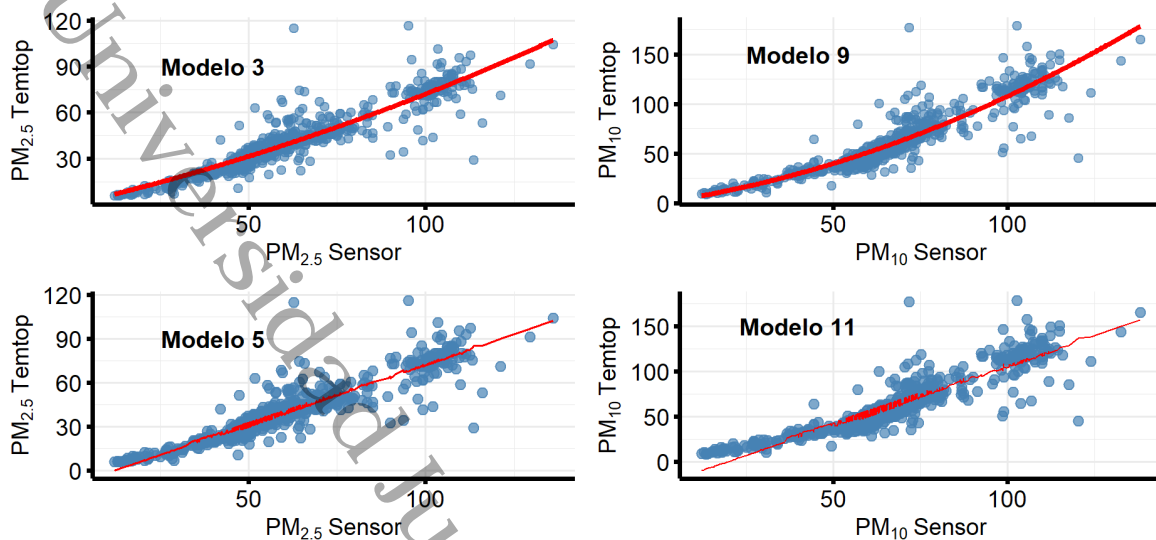
**Tabla 9**  
**Curvas de Calibración para la Parada Foránea**

No.	R <sup>2</sup>	Curva de calibración
1	0.96	$pm2.5_{cal} = 0.680436 * pm2.5_{sen}$
2	0.85	$pm2.5_{cal} = -9.10354 + 0.81054 * pm2.5_{sen}$
3*	0.97	$pm2.5_{cal} = 0.5351817 * pm2.5_{sen} + 0.0018551 * pm2.5_{sen}^2$
4	0.86	$pm2.5_{cal} = -15.41026 + 0.81075 * pm2.5_{sen} + 0.10811 * HR$
5	0.97	$pm2.5_{cal} = 0.82709 * pm2.5_{sen} - 0.27463 * T$
6	0.23	$pm2.5_{cal} = -260.6458 + 5.4934 * T + 1.6807 * HR$
7	0.95	$pm10_{cal} = 0.972785 * pm10_{sen}$
8	0.84	$pm10_{cal} = -24.42484 + 1.29744 * pm10_{sen}$
9*	0.97	$pm10_{cal} = 0.5139396 * pm10_{sen} + 0.0056377 * pm10_{sen}^2$
10	0.85	$pm10_{cal} = 119.16795 + 1.44366 * pm10_{sen} - 2.88219 * T - 0.80595 * HR$
11	0.97	$pm10_{cal} = 1.32317 * pm10_{sen} - 0.70654 * T$
12	0.24	$pm10_{cal} = -409.0824 + 8.6020 * T + 2.6522 * HR$

**Nota:** Los modelos marcados (\*) son los aplicados al sensor PMS5003, para las lecturas de concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la parada foránea.

**Fuente:** Elaboración propia con base de datos del periodo de calibración.

La Figura 16 muestra los gráficos de dispersión de la concentración de partículas medidas por el monitor Temtop contra las concentraciones medidas por el dispositivo ahora en la parada foránea. Las líneas de color rojo representan las curvas de calibración que se ajustaron a los datos observados. Para las PM<sub>2.5</sub> las curvas se corresponden con los modelos 3 y 5 de la Tabla 9, y para las PM<sub>10</sub> corresponden a los modelos 9 y 11. Los 4 modelos mencionados tuvieron un R<sup>2</sup> de 0.97 y se presentan aquí para propósitos de comparación. Finalmente se prefirieron los modelos 3 y 9 por ser más sencillos ya que solo utilizan la lectura de concentración de partículas del sensor PMS5003 como variable correctora.

**Figura 16**

Relación de Concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , Entre Temtop vs PMS5003, en Parada Foránea

Fuente: Elaboración propia en R.

Hay que mencionar que dichos modelos de calibración se obtuvieron para un rango de temperatura y humedad de 30.7 a 42.3 °C y 44 a 75 % en la parada local y de 30.9 a 42.6 °C y 42 a 79 % en la parada foránea. Se reconoce que, al no permanecer dentro de las condiciones del monitoreo de calibración, para el uso de monitoreo continuo es recomendable realizar una nueva calibración, con las condiciones atmosféricas más actuales. Al no estar demasiado tiempo fuera del rango de las condiciones de calibración, se opta por utilizar dichos modelos ya aplicados dejando que el dispositivo interpole los datos.

#### 9.4 Análisis Estadístico de las Concentraciones de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ , Estableciendo Valores Base y Comparación Entre Ambas Paradas

Las Tablas 10 y 11 contienen un resumen estadístico de temperatura, humedad relativa,  $PM_{2.5}$  del sensor y  $PM_{10}$  del sensor, para la parada local, como la parada foránea. Cabe mencionar que los datos de concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  del dispositivo mostrados en dichas tablas, son del monitoreo con el equipo calibrado. Comparando ambas tablas, la temperatura de la parada foránea fue mayor que la temperatura de la parada local. Por ejemplo, la diferencia entre medias fue de 0.9 °C y la diferencia entre



máximos fue de 1.9 °C. En cuanto a la HR, en la parada local, el mínimo, máximo y promedio fueron mayores que en la parada foránea.

Continuando con las Tablas 10 y 11 se tiene que la concentración de PM<sub>2.5</sub> en la parada local es ligeramente superior al de la parada foránea. Usando la mediana como criterio de comparación, la concentración difiere solo 2.5 µg/m<sup>3</sup>. La variación en la concentración es casi la misma, solo difieren en 0.7 µg/m<sup>3</sup>. En lo que respecta a las PM<sub>10</sub>, la concentración en la parada local fue solo 3.5 µg/m<sup>3</sup> mayor que en la parada foránea; mientras que la concentración fue un poco más variable en la parada local que en la foránea tomando como base la desviación estándar, aunque la diferencia fue solo de 1.3 µg/m<sup>3</sup>.

Se evaluaron los intervalos de confianza (IC) con respecto a las medias en ambas paradas. El promedio de temperatura en la parada local fue de 0.18 °C (IC del 95%: [31.3, 31.6]). La parada foránea se encontró IC similar al de la parada local donde fue de 0.18 °C (IC del 95%: [32.1, 32.5]). El promedio de la humedad relativa en parada local fue de 0.79 % (IC del 95%: [69.0, 70.6]). La parada foránea fue de 0.58 % (IC del 95%: [67.0, 68.1]).

De igual manera se evaluó su IC por parada de la media aritmética de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Donde el promedio de la concentración PM<sub>2.5</sub> de parada local fue de 1.73 µg/m<sup>3</sup> (IC del 95%: [46.9, 50.3]). La parada foránea se encontró un promedio similar con una diferencia de 0.02, donde fue de 1.71 µg/m<sup>3</sup> (IC del 95%: [48.4, 51.8]). Para el promedio de las concentraciones de partículas de PM<sub>10</sub> en parada local fue de 2.9 µg/m<sup>3</sup> (IC del 95%: [69.2, 75.0]). Mientras que la parada foránea tuvo en promedio 0.58 µg/m<sup>3</sup> (IC del 95%: [76.3, 82.1]).



**Tabla 10**  
*Medidas de Tendencia Central y Estadísticas, en Parada Escolar Local, Durante el Periodo Mayo-Junio de 2025*

Parámetro	Min	Max	Media	Mediana	DE	LI	LS
Temperatura	26.6	34.7	31.4	32.1	2.1	31.3	31.6
Humedad Relativa	58	91	69.8	66.0	9.1	69.0	70.6
PM <sub>2.5</sub> Sensor	3.9	134.2	48.6	46.7	28.0	46.9	50.3
PM <sub>10</sub> Sensor	0.0	212.4	72.1	73.0	47.0	69.2	75.0

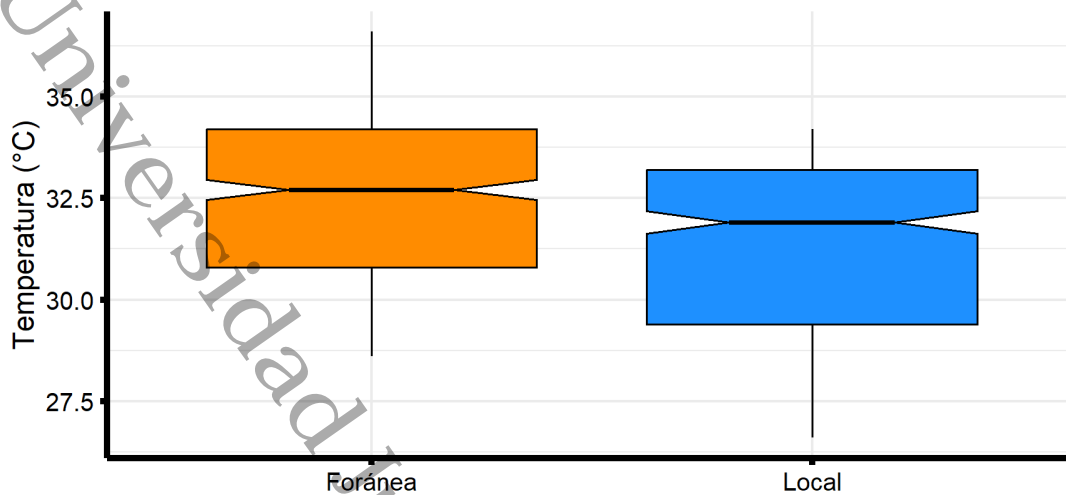
**Fuente:** Elaboración propia con base de datos del periodo de calibración-monitoreo continuo.

**Tabla 11**  
*Medidas de Tendencia Central y Estadísticas, en Parada Escolar Foránea, Durante el Periodo Mayo-Junio de 2025*

Parámetro	Min	Max	Media	Mediana	DE	LI	LS
Temperatura	27.8	36.6	32.3	32.5	2.1	32.1	32.5
Humedad Relativa	56	81	67.5	67.0	6.8	67.0	68.1
PM <sub>2.5</sub> Sensor	5.7	252.4	50.1	44.2	27.3	48.4	51.8
PM <sub>10</sub> Sensor	6.3	400.8	79.2	69.5	45.7	76.3	82.1

**Fuente:** Elaboración propia con base de datos del periodo de calibración-monitoreo continuo.

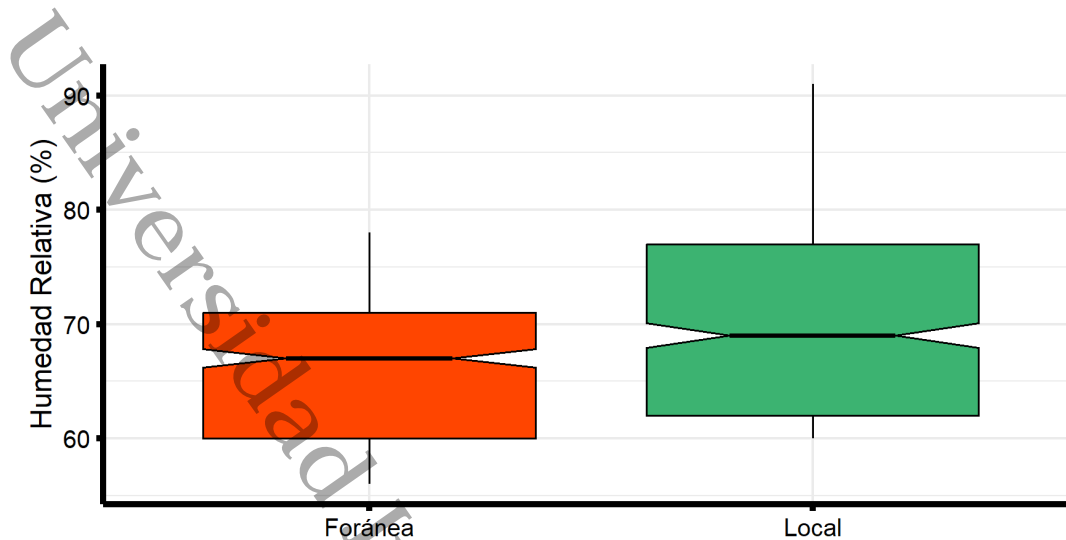
La Figura 17 muestra la tendencia espacial del comportamiento de la Temperatura en ambas paradas de transporte. Con base solo en la mediana, se obtuvo que la temperatura en la parada foránea tendió a ser mayor que en la parada local; sin embargo, la diferencia entre medianas fue de tan solo 0.4 °C. Utilizando la DE como estadístico de comparación, se nota como en ambas paradas la variación de la temperatura es parecida.

**Figura 17**

*Graficas de Caja y Bigote, Comparando Datos de Concentraciones de Temperatura en Parada Local vs Foránea*

*Fuente: Elaboración propia con base de datos del periodo de monitoreo continuo Junio 2025.*

La Figura 18, muestra ahora la tendencia espacial en la humedad relativa entre ambas paradas. Con base en la mediana, la humedad fue mayor por un 1% en la parada local que en la parada foránea. Los datos de humedad de la parada local fueron más variables que los de la parada foránea; la diferencia fue de 2.3 %. Incluso se podría decir que el comportamiento con respecto a estas dos variables, T y HR no es tan diferente. Estas dos paradas están a orilla de carretera y el factor que más influye es la condición térmica del día.

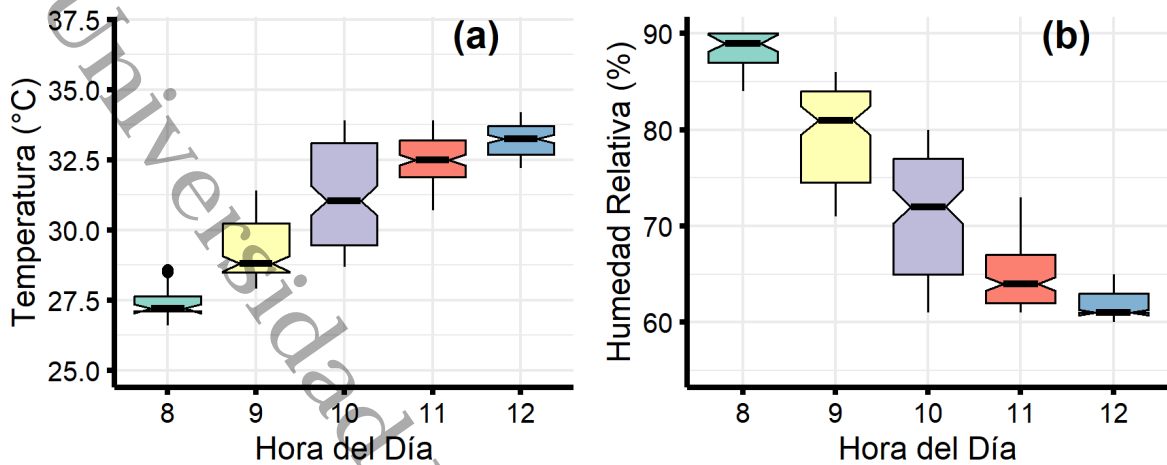


**Figura 18**

*Gráficas de Caja y Bigote, Comparando Datos de Concentraciones de Humedad Relativa en Parada Local vs Foránea*

*Fuente: Elaboración propia con base de datos del periodo de monitoreo continuo Junio 2025.*

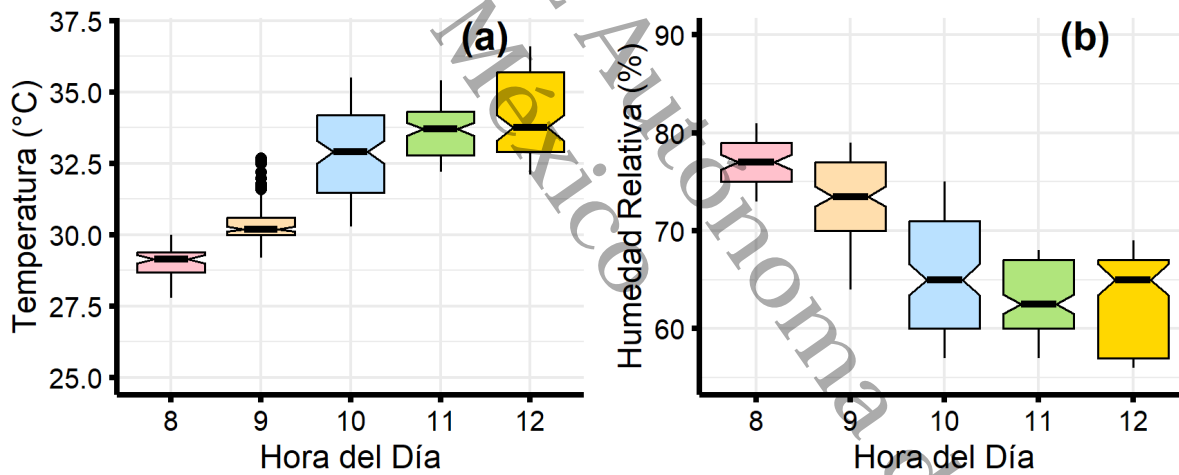
En las Figuras 19 y 20 presentan las tendencias horarias de la temperatura (a) y la humedad relativa (b) en la parada local y foránea respectivamente de las 8 horas a las 12 horas. En ambas paradas la temperatura tendió a aumentar mientras que la humedad relativa tendió a disminuir. Con base al valor de la mediana, en la parada local, la T y HR fueron de 27.2 °C y 89 % a las 8 am y de 33.2 °C y 61 %, a las 12 pm. La temperatura incrementó 6 °C en un intervalo de 5 horas (Figura 19). En la parada foránea la temperatura y humedad fueron de 29.2 °C y 75 % a las 8 am y de 33.8 °C y 65 %, a las 12 pm. En esta parada, la temperatura incrementó 4.6 °C en un intervalo de 5 horas (Figura 20). Estos resultados son coherentes con lo esperado: la temperatura aumenta durante la mañana y la humedad relativa disminuye.



**Figura 19**

Graficas de Caja y Bigote, Comparando Datos de Concentraciones de Temperatura y Humedad Relativa por Hora, en Parada Local

Fuente: Elaboración propia con base de datos del periodo de monitoreo continuo Junio 2025.

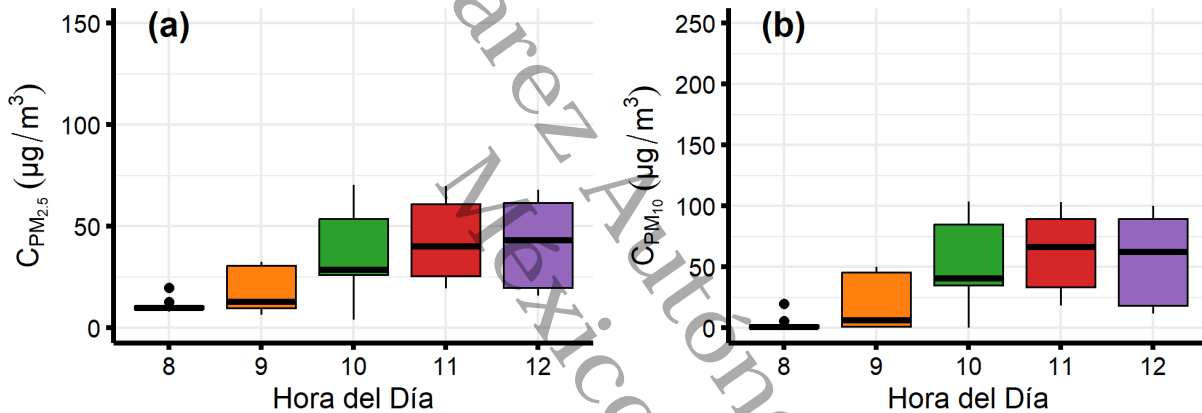


**Figura 20**

Graficas de Caja y Bigote, Comparando Datos de Concentraciones de Temperatura y Humedad Relativa por Hora, en Parada Foránea

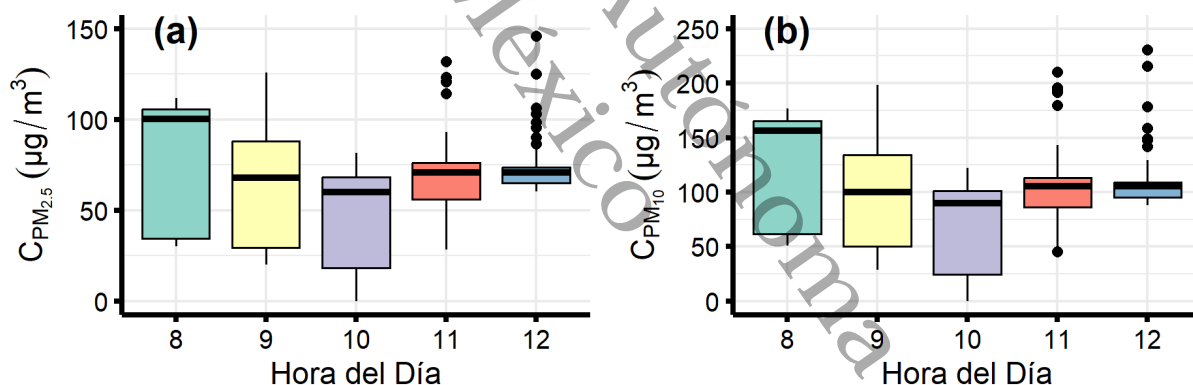
Fuente: Elaboración propia con base de datos del periodo de monitoreo continuo Junio 2025.

En la Figura 21 muestra la tendencia horaria de la concentración de partículas  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en la parada local. La concentración de partículas de  $PM_{2.5}$  tendió a aumentar desde las 8 am donde su valor fue de  $9.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hasta las 12 pm donde fue de  $43.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , hora donde también fue más variable. El incremento observado fue de  $33.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un intervalo de 5 horas. La concentración de  $PM_{10}$  tendió a aumentar de 8 a 11 horas, disminuyendo después a las 12 horas donde también la concentración fue más variable. A las 8 am el valor registrado fue de  $0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y a las 12 pm fue de  $61.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; la diferencia fue de  $61.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Como se puede observar en general la concentración de partículas tendió a aumentar con la hora del día.



**Figura 21**  
*Graficas de Caja y Bigote, Comparando Datos de Concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  por Hora, en Parada Local*  
**Fuente:** *Elaboración propia con base de datos del periodo de monitoreo continuo Junio 2025.*

La Figura 22 nuevamente muestra la tendencia horaria de la concentración de partículas  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , ahora en parada foránea. La concentración de partículas  $PM_{2.5}$  fue máxima a las 8 am y mínimo a las 9 am y a partir de esta hora incrementó en  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  su valor hasta las 12 pm, aunque la concentración de esta hora no supero el máximo observado en la mañana. El máximo fue de  $103.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el mínimo fue de  $52.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . De igual manera la concentración de  $PM_{10}$  tendió a tener un comportamiento semejante a las  $PM_{2.5}$ . La concentración máxima fue de  $177.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 8 am y la mínima fue de  $81.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 9 am. A partir de la hora 9, la concentración aumento hasta la hora 12 incrementándose en  $24.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Que la concentración de partículas pase de un máximo a un mínimo entre 8 a 9 am coincide con el hecho de que, en ese periodo en la parada foránea, el transporte se detuvo en la parada tanto para bajar pasaje escolar como para subir trabajadores que se dirigen a sus respectivos trabajos. después de ese periodo esta actividad disminuyó significativamente.



**Figura 22**

*Graficas de Caja y Bigote, Comparando Datos de Concentraciones de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  por Hora, en Parada Foránea*

*Fuente: Elaboración propia con base de datos del periodo de monitoreo continuo Junio 2025.*

No se realizó un análisis en base a los criterios de la NOM-025-SSA1-2021 para determinar si se cumplía o no esta norma en las paradas de transporte. Ya que esta norma establece límites máximos permisibles a la concentración de 24 horas y en este trabajo a lo más se establecieron valores para la concentración promedio horario y solo durante la mañana. Sin embargo, sus valores se usaron como referencia. Por ejemplo,



en la parada foránea, la concentración horaria de  $PM_{2.5}$  fue mayor a  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que es lo que establece la norma, pero en un promedio de 24 h y la de  $PM_{10}$  fue de mayor a  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . De continuar esa tendencia se excederían los límites máximos permitidos de 24 horas en la parada foránea.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México



## 10. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la calibración con el monitor Temtop M200C han comparado con diversos estudios donde se usaron equipo, métodos o condiciones similares realizadas en la literatura.

En las campañas de monitoreo llevadas a cabo en las paradas de transporte local y foránea, se observó que durante horarios específicos la afluencia del tráfico vehicular es mayor a otras. En la parada local se registró una mediana máxima a las 11 am de 40.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2.5</sub> y 66.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub>. Mientras que la parada foránea registro una mediana máxima a las 8 am de 100.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2.5</sub> y 156.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub>. Esto lleva a considerar que el tráfico vehicular es determinante para el aumento de las concentraciones de material particulado grueso y fino, esto por la re-suspensión por las corrientes de aire generada por los vehículos y sobre todo el transporte pesado (Harantová et al., 2023).

Se ha observado que la temperatura y la humedad se correlacionan significativamente con la concentración de partículas. En este trabajo se obtuvieron coeficientes de correlación hasta del orden de 0.30 entre la humedad relativa y las PM<sub>10</sub> en la parada local y hasta de 0.20 con la humedad relativa en la parada foránea. Sin embargo, por si sola estas variables no son suficientes para calibrar las lecturas del sensor PMS5003 como han comprobado otros autores (A. Amoah et al., 2023). Definitivamente se requiere la lectura del sensor de partículas como variable predictora y, de hecho, esta variable se correlaciona positivamente con datos observados con valores superiores a 0.90. En el estudio realizado en la autopista Hang Rui, China por Shao *et al.* (2017) durante la primavera y el invierno de 2017, las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> tuvieron una correlación negativa con la temperatura, positiva con la humedad relativa y positiva con el flujo de tráfico, especialmente cuando transitan camiones grandes. Solo considerando la HR como variable correctora donde obtuvieron R<sup>2</sup> entre 0.42 y 0.95 variando en diferentes meses. Teniendo un patrón: invierno > primavera donde la concentración de PM<sub>2.5</sub> fue más elevada, demostrando que las condiciones



atmosféricas si afectan al comportamiento de las partículas, por ello es de suma importancia realizar calibraciones que estén más allá de un solo día para no caer en un solo rango de condiciones atmosféricas.

Los SBC implementados PMS5003 y DHT22 son altamente probados para el monitoreo ambiental. La alta fiabilidad de estos sensores se demostró durante todo este trabajo, donde no se mostraron fayas de operatividad, lecturas erróneas o anómalas con el monitor de referencia. El sensor PMS5003 es un SBC de dispersión laser, tecnología altamente probada en trabajos anteriores como el estudio de Di Antonio *et al.* (2018) donde aborda el efecto de la HR en la medición de este tipo de sensores. En su investigación utilizaron sensores OPC-N2 y equipo de referencia GRIMM EDM180 en Londres, Inglaterra, desde agosto hasta diciembre. Antes de la calibración, los sensores tenían un factor de error de hasta 5.3 veces y después de aplicar el modelo de corrección se redujo a 1.05 veces, demostrando que los sensores ópticos, aunque presentan errores en condiciones de alta humedad, la calibración de este ya sea por un modelo basado en la física del aerosol o de manera estadística mejora el desempeño del sensor.

Un parámetro importante cuando se hace regresión lineal múltiple es el coeficiente de determinación,  $R^2$ . Los parámetros del modelo pueden pasar las pruebas de hipótesis correspondientes, pero si su  $R^2$  es muy bajo, el modelo no se considera bueno. En este trabajo los modelos de regresión lineal simple y múltiple utilizados para la calibración obtuvieron un  $R^2$  mayor a 0.90. Feng Shao *et al.* (2019) desarrollaron un sistema de detección de PM<sub>2.5</sub> basado en SBC usando un fotodiodo de 40° y comparó sus mediciones con una estación TEOM 1405-D en la provincia de Wolonggiao en China. El programa de monitoreo abarcó 8 días con periodos diarios de una hora y con esta información ajustó un modelo de regresión polinomial cuadrática, que arrojó valores de  $R^2$  entre 0.98 y 0.95 comparables a los que se obtuvieron en este trabajo. El equipo desarrollado por Cavaliere *et al.* (2018) implementó la calibración de un sensor Novasense SDS011 con capacidad de medir la concentración de PM<sub>10</sub> con un laboratorio CNR-IBIMET en Florencia, Italia. La curva de calibración ajustada, un modelo de



regresión lineal robusta, alcanzo una  $R^2$  de 0.96. Los resultados anteriores ponen en evidencia la necesidad de la calibración del sensor, incluso aun cuando se trate del mismo sensor, pero el sitio de interés cambie (Vital Strategies, 2022). Burbano Villavicencio y Vélez Macancela (2024) realizó un estudio en Cuenca, Ecuador, donde implemento el sensor SPS30 para registrar mediciones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> durante aproximadamente un mes. Como curvas de calibración obtuvo modelos de regresión lineal simple con un  $R^2$  de 0.69 para PM<sub>2.5</sub> y de 0.59 para PM<sub>10</sub>. Vélez reportó concentraciones de PM<sub>2.5</sub> máximas y mínima de 34.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 19.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Para las PM<sub>10</sub> reportó máximos y mínimos de 34.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 19.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Estas mediciones las realizó a una altura de seis metros en una calle de tierra de flujo vehicular intermitente, según el autor. Al comparar estos resultados con los de la parada foránea, se observa una gran diferencia pues los máximos de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> fueron de 252.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 400.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente y los mínimos fueron de 5.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 6.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Claro estas mediciones fueron hechas a una altura de menos de 2 m y en una zona de flujo vehicular significativo como la parada foránea.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



## 11. Conclusiones y Recomendaciones

### 11.1 Conclusiones

- Tomando como base el valor de las medianas, las concentraciones tomadas con el sensor PMS5003 tendieron a ser mayores que las registradas con el monitor Temtop. La excepción fue la concentración de PM<sub>10</sub> en la parada local, donde el sensor tendió a subestimar las concentraciones del monitor. En general, la diferencia en la concentración PM<sub>2.5</sub> fue hasta de 23.9 µg/m<sup>3</sup> mientras que para las PM<sub>10</sub> fue de hasta 9.9 µg/m<sup>3</sup>. Este resultado fue el esperado ya que muchos trabajos con SBC sugieren que se calibre el equipo para mejorar las lecturas.
- Los modelos de curvas de calibración que mejor se ajustaron para las concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, obtuvieron coeficientes de determinación mayores a 0.90. En la parada local la mejor curva de calibración de PM<sub>2.5</sub> fue el modelo 1, un modelo de línea recta sin ordenada al origen, con un R<sup>2</sup> de 0.99 y para PM<sub>10</sub> se eligió el modelo 6 que igual es un modelo de línea recta, pero con ordenada al origen con un R<sup>2</sup> de 0.92. En la parada foránea el que mejor se ajustó para las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> fue el modelo 3 con un R<sup>2</sup> de 0.97.
- Con respecto a la concentración de PM<sub>10</sub>, el mejor modelo fue el modelo 9 con un R<sup>2</sup> de 0.97. Ambos modelos son polinomios de segundo orden donde la única variable correctora es la lectura de las concentraciones de las partículas medidas por el sensor PMS5003. Los modelos de regresión lineal simple o múltiple son fáciles de implementar, no requieren de conocimientos avanzados por lo que se sugiere utilizarlos en trabajos posteriores.
- De acuerdo con la tendencia horaria, la temperatura en la parada local alcanzo un valor máximo de 33.2 °C a las 12 pm y un mínimo de 27.2 °C a las 8 am. La humedad relativa alcanzo un valor máximo de 89 % a las 8 am y un mínimo de 61 % a las 12 pm. En la parada foránea la temperatura máxima fue 33.8 °C a las 12 pm y la mínima



fue de 29.2 °C a las 8 am. La humedad relativa alcanzo un valor máximo a las 8 am de 75 % y un mínimo a las 11 am de 65 %. La tendencia observada está de acuerdo con lo esperado. La temperatura aumenta con la hora del día mientras que la humedad relativa baja. Tienen un comportamiento inverso. Por las primeras horas de la tarde pasa lo contrario, pero en este trabajo no se realizaron monitoreo después de las tres de la tarde.

- De acuerdo con la tendencia horaria y usando la mediana como medida de tendencia, la concentración horaria de partículas PM<sub>2.5</sub> alcanzo un valor máximo 43.0 µg/m<sup>3</sup> a las 12 pm y un mínimo de 9.74 µg/m<sup>3</sup> a las 8 am. La concentración máxima de PM<sub>10</sub> fue de 61.90 µg/m<sup>3</sup> a las 12 pm y su mínimo fue de 0.64 µg/m<sup>3</sup> a las 8 am. En la parada foránea, la concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> alcanzo un valor máximo a las 8 am de 103.0 µg/m<sup>3</sup> y un mínimo a las 12 pm de 52.7 µg/m<sup>3</sup>. Con respecto a las PM<sub>10</sub> el valor máximo fue de 177.0 µg/m<sup>3</sup> a las 8 su mínimo fue de 81.4 µg/m<sup>3</sup> a las 12 pm.

## 11.2 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y del análisis de estos, se hacen las siguientes recomendaciones.

- Contar con dos o más sensores PMS5003 para la detección de mal funcionamiento en caso de falla de uno de estos y aumentar el tiempo de vida operativa del dispositivo.
- Calibrar el sensor PMS5003, con otro equipo de referencia como el Temtop LKC-1000S, que cuenta con un sistema de registro de datos de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.
- Ampliar el periodo de monitoreo de calibración, esto para tener un mayor volumen de datos para lograr recopilar datos en periodos de 7 am hasta las 6 pm. Es importante mencionar que el área de estudio no es segura por las noches y por



ello no es factible realizar mediciones debido a que los equipos deben estar bajo supervisión continua para prevenir robos de los equipos.

- Realizar campañas de monitoreo en otras estaciones del año para analizar el comportamiento de la concentración de material particulado en periodos más largos durante el año.
- Alimentar el rendimiento del equipo con energía solar, integrando un panel que alimente fuentes de almacenamiento de energía restaurados (baterías de litio).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México



## 12. Glosario

### 12.1 Aire:

Mezcla de elementos y compuestos gaseosos, líquidos y sólidos, orgánicos e inorgánicos, presentes en la atmosfera.

### 12.2 Diámetro aerodinámico:

Equivalente al de una partícula esférica de densidad unitaria (1 g/cm<sup>3</sup>).

### 12.3 Microgramo por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>):

Expresión de concentración en masa de contaminante (en microgramos) en un volumen de aire (metro cubico) a condiciones locales de presión y temperatura.

### 12.4 Monitoreo:

Lugar en donde se mide de forma continua para determinar las concentraciones ambientales de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

### 12.5 Monitor:

Dispositivo de salida de una computadora que muestra de forma visual al usuario información procesada por la computadora.

### 12.6 Microcontrolador:

Es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.

### 12.7 Sensor:

Dispositivo que detecta y responde a un estímulo físico o químico del entorno, convirtiéndolo en una señal que pueda ser medida o interpretada.

### 12.8 Parada:

Lugar de detención temporal de un vehículo o persona.



### 13. Referencias Citadas

- A. Amoah, N., Xu, G., Kumar, A. R., & Yang Wang. (2023). Calibración de sensores de partículas de bajo costo para el monitoreo de polvo de carbón. *Science of The Total Environment*, 859(160336), Parte 2. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160336>
- Adafruit. (17 de Diciembre de 2017). *Adafruit*. PM2.5 Air Quality Sensor: <https://learn.adafruit.com/pm25-air-quality-sensor>
- Adafruit. (22 de Enero de 2025). *Adafruit*. Sensores DHT11, DHT22 y AM2302: <https://learn.adafruit.com/dht/overview>
- Antonio, D., Andrea, Popoola, O. A., Ouyang, B., Saffell, J., & Jones, R. L. (2018). Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter. *Sensors*, 9(2790), 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s18092790>
- Arduino. (2025). *Arduino Official Store*. Arduino uno R4: <https://store.arduino.cc/pages/uno-r4>
- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel., P. (2018). Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM2.5 Monitoring. *Journal of Sensors*, 2018(1), 16. <https://doi.org/https://doi.org/5096540>
- Bagheri, G., & Bonadonna, C. (2016). On the drag of freely falling non-spherical particles. *Powder Technology*, 301, 526 - 544. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.015>
- Buitrago Mesa, D. A., & Rodriguez Rodriguez, R. J. (2022). *Estado del arte del uso de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire por material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) en Colombia*. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/b19e648d-e738-4a10-99a1-a1ed7e1b3b5d/content>
- Burbano Villavicencio, J. S., & Vélez Macancela, F. X. (2024). *Implementación de un nodo para monitoreo de la contaminación del aire y diseño de la red de sensores en*



- ejes viales de Cuenca, Ecuador [Trabajo de Graduación]*. Universidad del Azuay. <http://dSPACE.uazuay.edu.ec/handle/datos/14876>
- Cavaliere, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, F., Gioli, B., Gualtieri, G., Martelli, F., . . . Zaldei, A. (2018). Development of Low-Cost Air Quality Stations for Next Generation Monitoring Networks: Calibration and Validation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Sensors. *Sensors*, 9(2843), 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s18092843>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Earl, B. (12 de Abril de 2013). *Adafruit Learning System*. AdaFruit Data Logger Shield: <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield>
- EPA. (12 de Diciembre de 2022). *La guía del sensor de aire mejorado (ID: 356426)*. EPA: [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=CEMM&dirEntryId=356426](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=CEMM&dirEntryId=356426)
- EPA. (2024, octubre 28). *Aire*. U. S. Environmental Protection Agency: <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>
- EPA. (25 de Junio de 2024). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. U.S. Environmental Protection Agency: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- EPA. (24 de Febrero de 2025). *Material Particulado en interiores*. U.S. Environmental Protection Agency.: <https://espanol.epa.gov/cai/material-particulado-en-interiores>
- Feng Shao, Wu, H., Li, G., Sun, F., Yu, L., Zhang, Y., . . . Bao, Z. (2019). Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en el cinturón verde cerca de la estación de peaje de Lin'an de la autopista Hang Rui y factores que influyen relacionados. *Atmósfera*, 32(4), 323-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.04.05>
- Flores Cortez, O. O., Cortez Reyes, R. A., & Idalia Rosa, V. (20 de Julio de 2022). Implementación de un sistema IoT de bajo costo para el monitoreo de la calidad



- del aire en El Salvador. *Facultad de Informática y Ciencias Aplicadas Universidad Tecnológica de El Salvador San Salvador*, pág. 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09975>
- Gakidou E., Afshin, A., Abajobir, A. A., Abate, K. H., Abbafati, C., Abbas, K. M., & Murray, C. J. (2017). Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *The Lancet*, 390(10100), 1345-1422. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32366-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32366-8)
- Gallego, L. M. (4 de Mayo de 2022). *Calibración de sensores de bajo costo para material particulado PM<sub>2.5</sub> mediante regresión y análisis de calidad del aire en Bogotá*. Universidad El Bosque. Universidad El Bosque.: <https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstreams/c8659ad6-f5b9-4518-9eef-1692c2f7ada7/download>
- Gavilanes Gavilánez, W. F. (2019). *PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO MP2.5 µm Y MP10 µm GENERADO POR FUENTES FIJAS Y MÓVILES EN LA AVENIDA SAN JUAN BOSCO SECTOR FERTISA SUR DE GUAYAQUIL*. UNIVERSIDAD AGRARIA DE ECUDOR. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GAVILANES%20GAVILANEZ%20WILMER%20FABRICIO.pdf>
- Gonzales Lavado, R. D., Diana Franczheska, M. H., & Magda, V. M. (2023). Analysis of environmental dispersion of particulate matter (PM 2.5 and PM10) worldwide over the last 10 years: A review of the scientific literature. *LACCEI*, 1(8), 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.737>
- Granados-Muñoz, M., Navas-Guzmán, F., Bravo-Aranda, J., Guerrero-Rascado, J., Lyamani, H., Valenzuela, A., . . . Alados-Arboledas., L. (2015). Hygroscopic growth of atmospheric aerosol particles based on active remote sensing and radiosounding measurements: selected cases in southeastern Spain. *Commons Atribución*, 8(2), 705 - 718. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/amt-8-705-2015>



- Harantová, V., Jozef, G., Marek, D., & Michal, L. (2023). Monitoring of territory pollution by particulate matter in relation to road traffic. *Transportation Research Procedia*, 74(ISSN 2352-1465), 224-231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.138>
- He., J., Huang., C.-H., Yuan., N., Austin., E., Seto, E., & Novosselov., I. (2024). Red de sensores de calidad del aire de bajo costo para monitorear la exposición a PM<sub>2.5</sub> en interiores, exteriores y personales en Seattle durante la temporada de incendios forestales de 2020. *Department of Environmental and Occupational Health Sciences, School of Public Health, University of Washington, Seattle, WA, United States*, 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.14140>
- Jacob, M. T., Michaux, K. N., Bertrand, B., Flore, T. S., Nasser, N., Ruben, F. S., . . . Saïdou. (2021). Low cost air quality monitoring system design and comparative. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1(1), 12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40095-021-00415-y>
- Jianzhao Bi., Carmona, N., Blanco, M. N., Gassett, A. J., Seto, E., Szpiro, A. A., . . . Sheppard., L. (2021). Publicly available low-cost sensor measurements for PM<sub>2.5</sub> exposure modeling: Guidance for monitor deployment and data selection. *Environment International*, 118(106897). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106897>
- Ophir Photonics. (5 de Junio de 2013). *Does Temperature Affect Laser Power Sensors?* Ophir Photonics Blog: <https://blog.ophiropt.com/does-temperature-affect-laser-power-sensors/>
- Orrego, A. Z. (14 de Septiembre de 2022). *Mejora continua de la red de monitoreo, pronóstico y alertas de la calidad del aire*. Clean Air: <https://globalcleanair.org/wp-content/blogs.dir/95/files/2022/11/Ponencia-2.-Ana-Zuleima-Orrego.pdf>
- Paweł, J., Storman, D., Mamica, M., Szymkowski, M., Żabicka, W., Wojtaszek-Główka, M., & Ligęza., A. (2022). Datasets for Automated Affect and Emotion Recognition from Cardiovascular Signals Using Artificial Intelligence— A Systematic Review. *Sensors* 2022, 22(2538). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22072538>



- Sánchez Paico, C. L., & Bautista Monsalve, M. Y. (30 de Diciembre de 2017). *Evaluación de la calidad del aire (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) en relación a los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad de viento) en el sector Cercado-Tarapoto, 2018*. UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN. Jovenes de la Ciencia: <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2012>
- Secretaria de Salud. (27 de Octubre de 2021). *NOM-025-SSA1-2021*. DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN.: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
- Shao, Zhang, H., & Zhou, H. (2017). Sensor de partículas finas basado en dispersión de luz multiángulo y fusión de datos. *Sensors*, 5(1033), 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s17051033>
- Sulistyan., P. M. (2021). Perancangan Sistem pemantau Tekanan Darah Dengan Sensor Tekanan MPX5100GP Berbasis STM32F103. *SinarFe7*, 4(1), 165-170. <https://doi.org/https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/45>
- Velázquez, A. A., & Cortés, P. d. (2015). *MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE INTERIOR EN EDIFICIOS DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Vishay Intertechnology, Inc. (9 de Octubre de 2012). *LCD 20x4 datasheet: LCD020N004L [Hoja técnica]*. Vishay: <https://www.vishay.com/docs/37314/lcd020n004l.pdf>
- Vital Strategies. (2022). *Uso integrado de sensores de bajo costo para fortalecer la gestión de la calidad del aire*. Vital Strategies: <https://www.vitalstrategies.org/wp-content/uploads/Usos-Integrados-de-Sensores-de-Bajo-Costo-para-Fortalecer-la-Gestio%CC%81n-de-la-Calidad-del-Aire.pdf>
- World Health Organization. (22 de Septiembre de 2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>



- World Health Organization. (24 de Octubre de 2024). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. WHO: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Ye, J., Li, J., Wang, P., Ning, Y., Liu, J., Yu, Q., & Bi., X. (1 de Agosto de 2022). Inputs and sources of Pb and other metals in urban area in the post leaded gasoline era. *Environmental Pollution*(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122006030?via%3Dihub>). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119389>.
- Yin, P., Brauer, M., Cohen, A. J., Wang, H., Li, J., Burnett, R. T., . . . Godwin., W. (2020). THE LANCET Planetary Health. *The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its provinces, 1990–2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017*, 4(9), e386-e398. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30161-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30161-3)
- Zivanov, J., Nakane, T., & Scheres, S. H. (2018). A Bayesian approach to beam-induced motion correction in cryo-EM single-particle analysis. *IUCrJ*, 6(1), 5-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1107/S205225251801463X>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



#### 14. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

<b>Título de Tesis:</b>	ANÁLISIS DE CONCENTRACIONES DE PM <sub>2.5</sub> Y PM <sub>10</sub> EN PARADAS DE TRANSPORTE USANDO SENSORES DE BAJO COSTO
<b>Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:</b>	Cristian Manuel Osorio de la Cruz
<b>ORCID:</b>	<a href="https://orcid.org/0009-0006-5775-581X">https://orcid.org/0009-0006-5775-581X</a>
<b>Resumen de la Tesis:</b>	<p>Este trabajo tuvo como objetivo principal determinar los niveles de concentración de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, temperatura y humedad relativa en dos paradas de transporte estudiantil, una parada local donde el flujo vehicular es menor y otra parada foránea donde el flujo vehicular es mayor, ambas situadas a las afueras de un campus universitario. Para ello se desarrolló un sistema de monitoreo ambiental basado en los sensores de bajo costo. También se utilizó un equipo portátil modelo Temtop 2000C como monitor de referencia para la calibración principalmente del sensor PMS5003. Durante el periodo de monitoreo la concentración de PM<sub>10</sub> fue hasta de 212 µg/m<sup>3</sup> en la parada local y hasta de 401 µg/m<sup>3</sup> en la parada foránea. Para las PM<sub>2.5</sub> la concentración fue hasta de 134 µg/m<sup>3</sup> y hasta de 252 µg/m<sup>3</sup> respectivamente. La temperatura varió entre 26.6 y 34.7 °C en la parada local y entre 27.8 y 36.6 °C en la parada foránea. La humedad relativa varió entre 58 y 91 % en la parada local y entre 56 y 81 % en la parada foránea. La tendencia observada fue que la concentración de partículas es mayor en la parada foránea que en la</p>



	<p>parada local. El monitoreo no se llevó a cabo durante las primeras horas del día, en la tarde y en la noche, dado que a estas horas los puntos de interés se encuentran sin presencia de personas.</p>
<p><b>Palabras claves de la Tesis:</b></p>	<p>Arduino uno, monitoreo, PMS5003, DHT22, material particulado, concentraciones de partículas.</p>
<p><b>Referencias citadas:</b></p>	<p>A. Amoah, N., Xu, G., Kumar, A. R., &amp; Yang Wang. (2023). Calibración de sensores de partículas de bajo costo para el monitoreo de polvo de carbón. <i>Science of The Total Environment</i>, 859(160336), Parte 2. <a href="https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160336">https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160336</a></p> <p>Adafruit. (17 de Diciembre de 2017). <i>Adafruit</i>. PM2.5 Air Quality Sensor: <a href="https://learn.adafruit.com/pm25-air-quality-sensor">https://learn.adafruit.com/pm25-air-quality-sensor</a></p> <p>Adafruit. (22 de Enero de 2025). <i>Adafruit</i>. Sensores DHT11, DHT22 y AM2302: <a href="https://learn.adafruit.com/dht/overview">https://learn.adafruit.com/dht/overview</a></p> <p>Antonio, D., Andrea, Popoola, O. A., Ouyang, B., Saffell, J., &amp; Jones, R. L. (2018). Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter. <i>Sensors</i>, 9(2790), 18. <a href="https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s18092790">https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s18092790</a></p> <p>Arduino. (2025). <i>Arduino Official Store</i>. Arduino uno R4: <a href="https://store.arduino.cc/pages/uno-r4">https://store.arduino.cc/pages/uno-r4</a></p> <p>Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., &amp; Modzel., P. (2018). Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM<sub>2.5</sub> Monitoring. <i>Journal of Sensors</i>, 2018(1), 16. <a href="https://doi.org/https://doi.org/5096540">https://doi.org/https://doi.org/5096540</a></p> <p>Bagheri, G., &amp; Bonadonna, C. (2016). On the drag of freely falling non-spherical particles. <i>Powder Technology</i>, 301, 526 - 544.</p>



<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.015>

Buitrago Mesa, D. A., & Rodriguez Rodriguez, R. J. (2022). *Estado del arte del uso de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire por material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) en Colombia*. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/b19e648d-e738-4a10-99a1-a1ed7e1b3b5d/content>

Burbano Villavicencio, J. S., & Vélez Macancela, F. X. (2024). *Implementación de un nodo para monitoreo de la contaminación del aire y diseño de la red de sensores en ejes viales de Cuenca, Ecuador [Trabajo de Graduación]*. Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/14876>

Cavaliere, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, F., Gioli, B., Gualtieri, G., Martelli, F., ... Zaldei, A. (2018). Development of Low-Cost Air Quality Stations for Next Generation Monitoring Networks: Calibration and Validation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Sensors. *Sensors*, 9(2843), 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s18092843>

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)

Earl, B. (12 de Abril de 2013). *Adafruit Learning System*. AdaFruit Data Logger Shield: <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield>

EPA. (12 de Diciembre de 2022). *La guía del sensor de aire mejorado (ID: 356426)*. EPA:



[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=CEMM&dirEntryId=356426](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=CEMM&dirEntryId=356426)

EPA. (2024, octubre 28). *Aire*. U. S. Environmental Protection Agency: <https://espanol.epa.gov/espanol/aire>

EPA. (25 de Junio de 2024). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. U.S. Environmental Protection Agency: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

EPA. (24 de Febrero de 2025). *Material Particulado en interiores*. U.S. Environmental Protection Agency.: <https://espanol.epa.gov/cai/material-particulado-en-interiores>

Feng Shao, Wu, H., Li, G., Sun, F., Yu, L., Zhang, Y., . . . Bao, Z. (2019). Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en el cinturón verde cerca de la estación de peaje de Lin'an de la autopista Hang Rui y factores que influyen relacionados. *Atmósfera*, 32(4), 323-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.04.05>

Flores Cortez, O. O., Cortez Reyes, R. A., & Idalia Rosa, V. (20 de Julio de 2022). Implementación de un sistema IoT de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en El Salvador. *Facultad de Informatica y Ciencias Aplicadas Universidad Tecnologica de El Salvador San Salvador*, pág. 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.09975>

Gakidou E., Afshin, A., Abajobir, A. A., Abate, K. H., Abbafati, C., Abbas, K. M., & Murray, C. J. (2017). Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *The Lancet*, 390(10100), 1345-1422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0140->



	<p>6736(17)32366-8</p> <p>Gallego, L. M. (4 de Mayo de 2022). <i>Calibración de sensores de bajo costo para material particulado PM<sub>2.5</sub> mediante regresión y análisis de calidad del aire en Bogotá</i>. Universidad El Bosque. Universidad El Bosque.: <a href="https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstreams/c8659ad6-f5b9-4518-9eef-1692c2f7ada7/download">https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstreams/c8659ad6-f5b9-4518-9eef-1692c2f7ada7/download</a></p> <p>Gavilanes Gavilánez, W. F. (2019). <i>PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO MP2.5 µm Y MP10 µm GENERADO POR FUENTES FIJAS Y MÓVILES EN LA AVENIDA SAN JUAN BOSCO SECTOR FERTISA SUR DE GUAYAQUIL</i>. UNIVERSIDAD AGRARIA DE ECUDOR. <a href="https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GAVILANES%20GAVILANES%20WILMER%20FABRICIO.pdf">https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/GAVILANES%20GAVILANES%20WILMER%20FABRICIO.pdf</a></p> <p>Gonzales Lavado, R. D., Diana Franczheska, M. H., &amp; Magda, V. M. (2023). Analysis of environmental dispersion of particulate matter (PM 2.5 and PM10) worldwide over the last 10 years: A review of the scientific literature. <i>LACCEI</i>, 1(8), 11. <a href="https://doi.org/https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.737">https://doi.org/https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.737</a></p> <p>Granados-Muñoz, M., Navas-Guzmán, F., Bravo-Aranda, J., Guerrero-Rascado, J., Lyamani, H., Valenzuela, A., . . . Alados-Arboledas., L. (2015). Hygroscopic growth of atmospheric aerosol particles based on active remote sensing and radiosounding measurements: selected cases in southeastern Spain. <i>Commons Atribución</i>, 8(2), 705 - 718. <a href="https://doi.org/https://doi.org/10.5194/amt-8-705-2015">https://doi.org/https://doi.org/10.5194/amt-8-705-2015</a></p> <p>Harantová, V., Jozef, G., Marek, D., &amp; Michal, L. (2023). Monitoring of territory pollution by particulate matter in relation to road traffic. <i>Transportation Research Procedia</i>,, 74(ISSN 2352-1465), 224-231. <a href="https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.138">https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.138</a></p>
--	---



He., J., Huang., C.-H., Yuan., N., Austin., E., Seto, E., & Novosselov., I. (2024). Red de sensores de calidad del aire de bajo costo para monitorear la exposición a PM<sub>2.5</sub> en interiores, exteriores y personales en Seattle durante la temporada de incendios forestales de 2020. *Department of Environmental and Occupational Health Sciences, School of Public Health, University of Washington, Seattle, WA, United States*, 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.14140>

Jacob, M. T., Michaux, K. N., Bertrand, B., Flore, T. S., Nasser, N., Ruben, F. S., . . . Saïdou. (2021). Low cost air quality monitoring system design and comparative. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1(1), 12. <https://doi.org/https://doi.o10.1007/s40095-021-00415-y>

Jianzhao Bi., Carmona, N., Blanco, M. N., Gassett, A. J., Seto, E., Szpiro, A. A., . . . Sheppard., L. (2021). Publicly available low-cost sensor measurements for PM<sub>2.5</sub> exposure modeling: Guidance for monitor deployment and data selection. *Environment International*, 118(106897). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106897>

Ophir Photonics. (5 de Junio de 2013). *Does Temperature Affect Laser Power Sensors?* Ophir Photonics Blog: <https://blog.ophiropt.com/does-temperature-affect-laser-power-sensors/>

Orrego, A. Z. (14 de Septiembre de 2022). *Mejora continua de la red de monitoreo, pronóstico y alertas de la calidad del aire*. Clean Air: <https://globalcleanair.org/wp-content/blogs.dir/95/files/2022/11/Ponencia-2.-Ana-Zuleima-Orrego.pdf>

Paweł, J., Storman, D., Mamica, M., Szymkowski, M., Żabicka, W., Wojtaszek-Główka, M., & Ligeza., A. (2022). Datasets for



Automated Affect and Emotion Recognition from Cardiovascular Signals Using Artificial Intelligence— A Systematic Review. *Sensors* 2022, 22(2538). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22072538>

Sánchez Paico, C. L., & Bautista Monsalve, M. Y. (30 de Diciembre de 2017). *Evaluación de la calidad del aire (PM10 y PM2.5) en relación a los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad de viento) en el sector Cercado-Tarapoto, 2018*. UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN. Jovenes de la Ciencia: <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2012>

Secretaria de Salud. (27 de Octubre de 2021). *NOM-025-SSA1-2021*. DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN.: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)

Shao, Zhang, H., & Zhou, H. (2017). Sensor de partículas finas basado en dispersión de luz multiángulo y fusión de datos. *Sensors*, 5(1033), 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s17051033>

Sulistyawan., P. M. (2021). Perancangan Sistem pemantau Tekanan Darah Dengan Sensor Tekanan MPX5100GP Berbasis STM32F103. *SinarFe7*, 4(1), 165-170. <https://doi.org/https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/45>

Velázquez, A. A., & Cortés, P. d. (2015). *MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE INTERIOR EN EDIFICIOS DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Vishay Intertechnology, Inc. (9 de Octubre de 2012). *LCD 20x4*



*datasheet: LCD020N004L [Hoja técnica].* Vishay: <https://www.vishay.com/docs/37314/lcd020n004l.pdf>

Vital Strategies. (2022). *Uso integrado de sensores de bajo costo para fortalecer la gestión de la calidad del aire.* Vital Strategies: <https://www.vitalstrategies.org/wp-content/uploads/Uso-Integrado-de-Sensores-de-Bajo-Costo-para-Fortalecer-la-Gestio%CC%81n-de-la-Calidad-del-Aire.pdf>

World Health Organization. (22 de Septiembre de 2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.* WHO: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

World Health Organization. (24 de Octubre de 2024). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud.* WHO: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Ye, J., Li, J., Wang, P., Ning, Y., Liu, J., Yu, Q., & Bi., X. (1 de Agosto de 2022). Inputs and sources of Pb and other metals in urban area in the post leaded gasoline era. *Environmental Pollution*(<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749122006030?via%3Dihub>).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119389>.

Yin, P., Brauer, M., Cohen, A. J., Wang, H., Li, J., Burnett, R. T., . . . Godwin., W. (2020). THE LANCET Planetary Health. *The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its provinces, 1990–2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017*, 4(9), e386-e398. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30161-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30161-3)

Zivanov, J., Nakane, T., & Scheres, S. H. (2018). A Bayesian approach to beam-induced motion correction in cryo-EM single-particle analysis. *IUCrJ*, 6(1), 5-17. *IUCrJ*, 6(1), 5 - 17.



	<a href="https://doi.org/https://doi.org/10.1107/S205225251801463X">https://doi.org/https://doi.org/10.1107/S205225251801463X</a>
--	---

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México