



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

División Académica de Ciencias Biológicas



**DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO
PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

MIPA. SERGIO RAMOS HERRERA

VILLAHERMOSA, TABASCO. FEBRERO DE 2026

Declaración de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, el día **22 de enero de 2026**, la que suscribe **SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ** alumna del Programa de **Lic. Ingeniería Ambiental** con número de matrícula **212G24023** adscrita a la **División Académica de Ciencias Biológicas** de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como **autora** de la **Tesis** presentado para la obtención del título de **Licenciatura en Ingeniería Ambiental**, titulado **“DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE”** dirigido por el **MIPA. SERGIO RAMOS HERRERA**.

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 de la Tesis presentado de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a **22 de enero de 2026**.



SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2020
Margarita
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

Villahermosa, Tab., a 23 de Enero de 2026


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 a la **C. SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ** egresada de la Lic. en **ING. AMBIENTAL** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis denominado: "**DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE**".

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 ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

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

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



2020
año de
Margarita
Maza

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN

ENERO 23 DE 2026

**C. SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ
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: **"DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE"**, asesorado por el MIPA. Sergio Ramos Herrera, sobre el cual sustentará su Examen Profesional, cuyo jurado está integrado por el MIA. Jesús Manuel Carrera Velueta, Dr. José Ramón Laines Canepa, MIPA. Sergio Ramos Herrera, Dr. Marco Antonio Hernández Cobián y Dr. José Ángel Gaspar Génico

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

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

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

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN



UJAT
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



2026
año de
Margarita
Maza

**División Académica de Ciencias Biológicas
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS TERMINALES**

22 de enero de 2026

C. SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ
Egresada 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 **DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE.**

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

RESULTADO DE SIMILITUD	0 %
	80 páginas y 19018 palabras

Finalmente, se le solicita a la **C. SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ**, 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



DIRECCIÓN

C.c.p. MIPA. Sergio Ramos Herrera. Director de trabajo recepcional
C.c.p. Archivo

KM 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
VILLAHERMOSA, CENTRO, TABASCO, MEX.
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 e-mail: direccion.dacbiol@ujat.mx

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques

SANDRA DE LA CRUZ LÓPEZ

DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:548431507

Fecha de entrega

22 ene 2026, 2:33 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

22 ene 2026, 2:40 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Sandra De la Cruz López_TR Tesis.pdf

Tamaño del archivo

2.7 MB

80 páginas

19.018 palabras

100.309 caracteres

0% 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

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

Marcas de integridad




N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
98 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

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

- 0%  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	repositorio.uchile.cl	<1%
2	Publicación	Castillo Sarmiento, Luis Fernando Cesar Jose Gonzales Zegarra, Oliver Ray Go...	<1%
3	Internet	www.gob.mx	<1%
4	Internet	www.slideshare.net	<1%

Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 22 de enero de 2026

Por medio de la presente manifiesto haber colaborado como AUTORA en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "DESARROLLO DE UN SISTEMA EMISOR-RECEPTOR DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE" 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


Sandra de la Cruz López
Nombre y Firma del egresado


Sergio Ramos H.
Nombre y Firma del director de tesis

TESTIGOS


Gabriela de la Cruz López


Ricardo Alonso Tecó Pomello



Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por darme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, Candelario y Marí, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio diario. Gracias por creer en mí, por impulsarme a seguir adelante y por ser el pilar fundamental de todo lo que soy.

A mi hermana Gaby, por estar siempre a mi lado, por su apoyo, comprensión y palabras de ánimo. Tu cariño y compañía han sido una motivación constante a lo largo de este camino.

De manera muy especial, agradezco al Profesor Sergio Ramos Herrera por su guía, paciencia y dedicación. Gracias por acompañarme en todo momento, compartir sus conocimientos y orientarme con profesionalismo para la realización de este trabajo.

A los miembros del comité sinodal, agradezco su tiempo, orientación y valiosas sugerencias, que enriquecieron y fortalecieron la realización de este trabajo.

A mis amigos, en especial a Ricardo, Mery, Adrik, Maty y Carlos, quienes desde el inicio de esta etapa han estado incondicionalmente conmigo, brindándome apoyo, motivación y una amistad sincera en cada paso del proceso.

A mis cotorritos Franky y Rita, quienes con su compañía, alegría y presencia constante me brindaron consuelo y motivación en los momentos de cansancio. Su apoyo silencioso fue invaluable durante esta etapa.

A Ricardo y a Don Miguel, gracias por su apoyo, esfuerzo y compromiso con mi familia. Y a Lenin, quien me vio crecer desde niña; aunque ya no esté con nosotros, su recuerdo y su cariño permanecerán siempre en nuestros corazones.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que formaron parte de mi camino, cuyos recuerdos, enseñanzas y huellas permanecen conmigo. Aunque la vida haya tomado rumbos distintos, siguen siendo parte importante de mi historia. Este logro también les pertenece, porque fueron impulso, aprendizaje y fortaleza en mi vida.



Dedicatoria

Mi tesis la dedico con todo amor y cariño a:

Dios, por su presencia constante a lo largo de mi vida y por ser fuente de fortaleza, sabiduría y esperanza. Gracias por guiar mis pasos, darme la paciencia y la fe para enfrentar los desafíos, y por permitirme alcanzar este logro como reflejo de crecimiento personal y espiritual.

Mi familia, al hombre que más amo y admiro, Candelario de la Cruz Pérez, por apoyarme y confiar en mí en todo momento, y por enseñarme que una mujer tiene suficiente valor por sí misma, no solo por ser mujer, sino por su capacidad, fortaleza y determinación para hacer posibles sus sueños. A mi hermosa madre, María Ramos López Alvarado, por su amor incondicional y apoyo constante. Gracias por estar presente en cada etapa de mi vida, por guiarme con paciencia, corregirme cuando me equivoco y recordarme siempre que los sueños son posibles. Todo lo que soy y lo que logro lleva tu amor. Te amo, mami. A mi niña Gabriela de la Cruz López, quien además de ser mi hermana, es mi amiga y confidente. Por estar conmigo en cada paso que doy, por tu cariño, tus risas y por ser siempre la persona con quien encuentro alegría y apoyo. A mis queridas abuelas, Natalia Alvarado y María Pérez, por su amor infinito, sus enseñanzas y su ejemplo de vida. Gracias por cada abrazo, palabra y gesto que ha llenado mi corazón de alegría y sabiduría.

A mí, por el esfuerzo constante, la disciplina y la valentía para no rendirme en los momentos difíciles. Por creer, aun con dudas, y seguir adelante hasta alcanzar esta meta. Este trabajo es testimonio de mi perseverancia y crecimiento.

“Valiente es aquel, que aun con dudas y con miedo, decide intentarlo por qué no nos ha dado Dios espíritu de cobardía” (2 Timoteo 1:7-9).

Con dedicación y esfuerzo, Sandra de la Cruz López.



Índice

1. Introducción	15
2. Justificación	16
3. Objetivos	17
3.1 Objetivo General	17
3.2 Objetivos Específicos	17
4. Antecedentes	18
5. Hipótesis	22
6. Marco Teórico	23
6.1 Contaminación del Aire por Material Particulado	23
Material Particulado	23
Fuentes de Emisión	24
Contaminantes Criterios	24
6.2 Arduino	26
La Placa Arduino	26
Arduino IDE	28
6.3 Sensores de Bajo Costo	29
Sensor de Partículas PMS5003	30
Sensor de Partículas PM-SDS011	31
Sensor de Polvo GP2Y1010AU0F	32
6.4 Sensores de Temperatura y Humedad	33
Sensor DHT22	33
Sensor DHT11	34
Sensor LM35	35
7. Metodología	36
7.1 Área de Estudio	36
7.2 Materiales	38
7.3 Diseño Electrónico del Sistema Emisor-Receptor	40
7.4 Desarrollo de los Dispositivos Electrónicos con SBC	44
7.5 Programación de los Dispositivos	45
7.6 Calibración del Sistema Emisor-Receptor	51
8. Resultados	55
8.1 Desarrollo del Hardware del Sistema Emisor-Receptor con SBC	55
8.2 Datos de Monitoreo para la Calibración del Sistema	57



8.3	Generación de Curvas de Calibración del Sistema con Monitor de Referencia	60
8.4	Estadísticos Generales de las Concentraciones de Partículas	68
9.	Discusión	78
10.	Conclusiones y Recomendaciones	81
11.	Glosario	84
12.	Referencias Citadas	85

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México



Índice de Tablas

Tabla 1. Materiales y costos utilizados para cada dispositivo del sistema emisor-receptor	39
Tabla 2. Conexiones de pines realizados para el emisor con la placa Arduino Mega	43
Tabla 3. Conexiones de pines realizados para el receptor con la placa Arduino Mega	43
Tabla 4. Estructura del Código del emisor en Arduino IDE	46
Tabla 5. Código del receptor almacenando datos en tarjeta microSD	47
Tabla 6. Curvas de Calibración para $PM_{2.5}$ y PM_{10} del Emisor de cada Sitio	61
Tabla 7. Curvas de Calibración para $PM_{2.5}$ y PM_{10} del Receptor cada Sitio	62
Tabla 8. Modelos de Calibración mostrando R^2 , MAE y RMSE de cada sitio	63
Tabla 9. Resumen de Medidas de Tendencia Estadísticas en LCADT, Cafetería y Estacionamiento	69

Índice de Figuras

Figura 1. Partes que conforman la Placa Arduino con microcontrolador modelo ATmega2560	27
Figura 2. Descripción de la Pantalla principal del Arduino IDE versión 2.3.6 con programa abierto	28
Figura 3. Partes del Sensor PMS5003	30
Figura 4. Sensor de Partículas SDS011	31
Figura 5. Sensor de Polvo GP2Y1010AU0F	32
Figura 6. Sensor DHT22, para medir variables de temperatura y humedad relativa	34
Figura 7. Sensores DHT11 con PCB y sin PCB	35
Figura 8. Partes del Sensor LM35	35
Figura 9. Área de Estudio	37
Figura 10. Diagrama de conexión electrónico del emisor	42
Figura 11. Diagrama de conexión electrónico del receptor	42
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología del diseño del emisor- receptor	50
Figura 13. Diseño y Estructura Final del Equipo Emisor. En el inciso a) Configuración interna del equipo emisor; b) Montaje del equipo portátil	56
Figura 14. Diseño y Estructura Final del Equipo Receptor. En el inciso a) Estructura interna del equipo Receptor, b) Montaje del equipo portátil	56
Figura 15. Proceso de calibración del Equipo Emisor-Receptor vs Temtop en a) LCADT, b) Cafetería y c) Estacionamiento	57
Figura 16. Gráficas de Caja y Bigote, para LCDAT, Cafetería y Estacionamiento. Comparando Datos del Sistema Emisor-Receptor vs Temtop	59
Figura 17. Modelos de calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del emisor y receptor en LCADT	65
Figura 18. Modelos de calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del emisor y receptor en Cafetería	66
Figura 19. Modelos de calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del emisor y receptor en Estacionamiento	67
Figura 20. Tendencia Horaria de Temperatura en; LCADT, Cafetería y Estacionamiento	71
Figura 21. Tendencia Horaria de Humedad Relativa del Aire en; LCADT, Cafetería y Estacionamiento	73
Figura 22. Tendencia Horaria de las Concentraciones de Partículas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en; LCADT, Cafetería y Estacionamiento	75
Figura 23. Comportamiento de la concentración promedio de 24 horas de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el sitio LCADT y comparación con el valor límite de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$	77



1. Introducción

El ingeniero ambiental tiene que estar a la altura de las nuevas tecnologías que coadyuvan con su quehacer profesional. Una de estas tecnologías está relacionada con la capacidad de desarrollar equipo de monitoreo emergente que permita realizar la comunicación de datos por medios inalámbricos, como la comunicación Bluetooth, Wifi o por radiofrecuencia. Esta tecnología está al alcance de cualquier persona con formación de ingeniero ya que actualmente existen plataformas con una buena cantidad de tutoriales para autoaprendizaje.

Ya que la calidad del aire representa un factor crítico para la salud pública y el equilibrio ambiental, la necesidad de implementar el desarrollo de sistemas económicos y funcionales de monitoreo se vuelve cada vez más importante (US EPA, 2025). Por ello, resulta fundamental el diseño de estrategias accesibles que permitan a comunidades y gobiernos locales obtener información confiable sobre la calidad del aire. En torno a esto, el de sensores de bajo costo (SBC) se ha posicionado como una alternativa viable para monitoreos constantes y detallados (Muñoz, 2018). De ahí que el ingeniero ambiental debe estar capacitado para implementar sistemas de monitoreo que aprovechen las tecnologías disponibles, especialmente donde el acceso a equipos sofisticados es limitado.

A veces es complicado acceder a un sitio de monitoreo y es preferible contar con un sistema que envíe los datos de un equipo directamente a la computadora o a internet. En este trabajo se presenta una metodología para desarrollar un sistema emisor-receptor que se comunican de forma inalámbrica vía Bluetooth. Integrando SBC que permitan la comunicación para almacenar datos ambientales, utilizando la plataforma de Arduino. A continuación, se presentan los aspectos principales que motivaron esta propuesta, los objetivos, conceptos clave que ayuden a entenderla y principalmente la metodología para el desarrollo y éxito de este trabajo.



2. Justificación

El impacto de la calidad del aire se ve reflejado tanto en la salud de la sociedad como en el medio ambiente. Existen estudios que demuestran que los efectos causados por la contaminación del aire causan problemas negativos directos a la salud. Por ello, los gobiernos buscan identificar las principales fuentes de emisión para prevenir el deterioro del medio ambiente y proteger la salud (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024). Las condiciones ambientales influyen en la calidad de vida de las personas y afectan a los ecosistemas (Peñaloza Acosta et al., 2019). Por lo tanto, es necesario el monitoreo y vigilancia de la calidad del aire. El monitoreo suele realizarse con equipo de referencia que es costoso lo que hace poco factible obtener información local. Por otra parte, desde hace algunos años, existe la posibilidad de desarrollar el equipamiento necesario para el monitoreo con sensores de bajo costo ideal para proyectos con bajo recurso económico (Cornner et al., 2017). Actualmente, las aplicaciones y nuevas tecnologías han dado una oportunidad para desarrollar prototipos funcionales y accesibles, a nivel académico, obteniendo contribuciones a la solución de problemas ambientales pues facilita la recolección de datos en tiempo real y mejora el entendimiento de las condiciones ambientales (TecScience, 2025).

El presente proyecto se enfocará en el desarrollo de un sistema de monitoreo que permita la obtención de datos de material particulado ($PM_{2.5}$, PM_{10}), temperatura y humedad relativa del aire, utilizando SBC y aplicaciones de acceso libre. La implementación de esta tecnología permitirá realizar mediciones en tiempo real en diferentes espacios de la DACBiol, tanto en ambientes cerrados como abiertos. La utilización de estos SBC ha tomado gran relevancia y dará mayor impulso de monitoreo de la calidad del aire con fines académicos o de investigación (CAI, 2023). El presente trabajo generará datos sobre la calidad del aire en la DACBiol. Además, sentará la base para desarrollo de estaciones al monitoreo funcionales y sostenibles, fortaleciendo el acceso a información confiable y la toma de decisiones informadas.



3. Objetivos

3.1 Objetivo General

3.1.1 Desarrollar y calibrar un sistema electrónico emisor-receptor con base en comunicación bluetooth que integre un sistema de adquisición de datos utilizando Arduino y sensores de bajo costo e implementarlo para generar datos de temperatura, humedad relativa, concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire exterior y así contar con información de línea base.

3.2 Objetivos Específicos

3.2.1 Diseñar un dispositivo electrónico emisor-receptor con un sistema de adquisición de datos vía bluetooth utilizando sensores de bajo costo compatibles con la tarjeta Arduino uno.

3.2.2 Desarrollar el dispositivo electrónico y calibrarlo con respecto a la concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ con un equipo Temtop de tipo comercial.

3.2.3 Implementar el dispositivo para generar datos de línea de base de temperatura, humedad relativa y concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en diferentes espacios de la DACBiol y analizarlos para establecer estadísticos de línea de base.



4. Antecedentes

En la industria de procesos de alimentos es importante mantener la temperatura y humedad en recipientes de alimentos. En 2007 Marmolejo, desarrolló un sistema de monitoreo de bajo costo de estas variables en el parque Industrial Valle, en Aguascalientes. Su dispositivo monitoreó las áreas de procesamiento de alimentos, utilizando un microcontrolador programable PIC16F877, un sensor de humedad con un convertidor de frecuencia a voltaje y un termistor que permitió la lectura de la temperatura. El diseño del sistema fue eficiente, de buena calidad y económico. Para la señal del sensor de humedad fue necesario que integrara una placa de circuito LM2917, que permitiera medir los datos de temperatura por lo que integró un divisor de voltaje entre un termistor y una resistencia. Los datos registrados fueron procesados y mostrados mediante un display de cristal líquido. Finalmente, para validar los datos calibró el sistema utilizando un hidrómetro modelo HI91610. Comparo los resultados obtenidos con los de medidores tradicionales concluyendo que los sistemas de bajo costo ofrecen resultados eficientes, destacando la viabilidad de implementarlos en pruebas de monitoreo ambiental.

La tecnología basada en SBC también se ha utilizado para generar adaptaciones tecnológicas que ayuden a personas discapacitadas. Por ejemplo, Ávila Paz (2017), diseño y desarrollo una tecnología para personas con discapacidad motriz. Utilizando equipos SBC, una silla de ruedas y una diadema que permitió la movilidad de las personas discapacitadas. La diadema permitió controlar la silla de ruedas mediante movimientos de la cabeza. El diseño implementó el uso microcontroladores ATmega168 y Arduino Nano, un módulo inalámbrico XBee, un módulo bluetooth HC-05 y HC-06, un módulo Wifi ESP8266EX, acelerómetro MMA7361 y MPU6050, y finalmente servomotores DC. También integró un sistema embebido, un módulo de reloj de 16MHz, y una batería recargable tipo power bank. La diadema la desarrollo en Blender, que es un software para el modelado 3D y luego la concluyo usando material epóxido al que le integro los sensores y probó su dispositivo en cuatro tipos de sillas eléctricas,



inicialmente probó la diadema con cabezas de maniquí y luego con personas. En las pruebas con personas la diadema no causó molestia. En su trabajo identificó fallas en los módulos que presentaban problemas de conexión. A pesar de ello, el diseño con tecnología de SBC demostró ser viable y efectivo como una solución de asistencia para personas con movilidad reducida.

Más recientemente, Calderón Ruiz (2019) diseñó y desarrolló un sistema de asistencia para personas invidentes llamado "prototipo BGE", utilizando SBC con comunicación vía bluetooth. El sistema constó de un bastón inteligente, gafas con sensores, y un módulo de alerta. El diseño se basó en el uso de sensores ultrasónicos, motores de vibración, microcontroladores Arduino (Nano y Uno) y módulos bluetooth HC-05. Los SBC fueron programados en Arduino IDE y con el software App Inventor diseñó una aplicación móvil que permitió la comunicación entre un usuario y el sistema electrónico. La aplicación permitió la conexión vía bluetooth, la integración de una lista de un registro de números telefónicos y el envío automático de mensajes de emergencia cuando el discapacitado sufría algún accidente. Esta última funcionalidad se implementó con el software libre MacroDroid y el mensaje incluyó las coordenadas GPS del dispositivo móvil. Para ello fue necesario tener un GPS activo para la ubicación, permitiendo el envío de alerta sin intervención manual. Factores externos como el ruido ambiental, la presión del aire y temperatura no afectaron la conexión de los módulos. En las pruebas el prototipo evitó los obstáculos mediante las señales vibratorias, y activó eficazmente el sistema de alerta en situaciones simuladas de emergencia. El costo de este "prototipo BGE" fue de un 60% más económico que los equipos comerciales. Finalmente, el autor sugirió incorporar un sistema de alerta auditivo y estudiar la fuente de alimentación autosustentable ya que el power bank que utilizó se descargaba rápidamente.

Asimismo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), ha impulsado el desarrollo de tecnologías emergentes basadas en sensores de bajo costo. En una revisión, Navarrete y Soto (2020), hacen referencias a las iniciativas promovidas



por la EPA. En su trabajo destacan que desde el 2013 la EPA ha promovido la creación de tecnologías compactas, económicas y eficientes, enfocadas en monitoreos a la calidad del aire. Posteriormente, en 2015, la EPA puso en marcha un proyecto experimental con una estación de monitoreo donde utilizó diversos SBC para medir contaminantes criterio, comprobando la estabilidad del sistema y detectando posibles interferencias entre variables. En 2017 la EPA obtuvo resultados favorables en mediciones de la concentración de SO_2 y el CO_2 en Lima, Perú, mediante estaciones móviles. Finalmente, en 2018, la EPA implementó un proyecto en colaboración con AirMapear para la detección de material particulado usando SBC integrados a un dispositivo compacto y móvil que permitió el monitoreo de mediciones en diferentes sitios.

Barrios Suter (2021) realizó un estudio experimental con la finalidad de evaluar el desempeño y la efectividad de SBC para la medición de concentraciones de material particulado PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 , en relación con los criterios de resolución espacial y temporal establecidos por la EPA. En su estudio empleó dos sensores PLANTOWER PMS7003, y como referencia utilizó un equipo automático modelo GRIMM Model 11C que mide partículas y que opera según un método de referencia federal. También utilizó una estación meteorológica DAVIS para generar datos de temperatura, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad del viento. Este estudio experimental se llevó a cabo durante nueve meses. Los equipos se ubicaron en un mismo lugar físico que fue el edificio Milenio de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, donde los sensores evaluaron simultáneamente las condiciones ambientales. Los resultados indicaron que los SBC mostraron un mejor desempeño en la medición de PM_1 , sin verse afectados por la temperatura y humedad. Para $\text{PM}_{2.5}$ los datos que se obtuvieron de las medidas de concentración fueron aceptables y mejoró el desempeño del equipo cuando se aplicaron modelos matemáticos de corrección. Los equipos se clasificaron de acuerdo con el nivel de uso en: 1) adecuados para proyectos educativos, 2) adecuados para la detección de fuentes emisoras y 3) adecuados para evaluar exposición personal. En lo que respecta a las PM_{10} se consideró que el equipo no fue el correcto para obtener los



datos de la concentración de este tipo de partículas. Pese a las limitaciones de los sensores, el estudio demostró que los SBC pueden integrarse en investigaciones junto a monitores de referencia, en conjunto ofreciendo ventajas como el registro y almacenamiento de datos, comunicación a larga distancia y potencial para ampliar el monitoreo atmosférico en áreas extensas mediante mejoras tecnológicas.

Ninahumán et al. (2022) realizaron un estudio entre agosto de 2018 y junio de 2019 en la ciudad de Huancayo, ubicada en los Andes, con el objetivo de evaluar los niveles de contaminación atmosférica principalmente de partículas finas ($PM_{2.5}$) con SBC comerciales. Este estudio se llevó a cabo en tres áreas con características diferentes dentro de la zona metropolitana en Huancayo: el Tambo (UNCP), Huancayo (HYO) y Chilca (CHI). Para ello, utilizaron sensores PurpleAir PA-II que tienen integrado un sensor de partículas PMS5003, y con los que fue posible registrar datos de $PM_{2.5}$ cada minuto. De acuerdo con sus resultados, los sensores tuvieron la capacidad de registrar datos aceptables y complementar la evaluación de la calidad de aire con equipos de referencias. Por ejemplo, se logró determinar que el alto uso vehicular influyó en las variaciones horarias y contribuyó a las altas emisiones de contaminación. De igual manera se determinó que las actividades escolares y comerciales influyen en la contaminación y que los fines de semana las mayores emisiones se dan en los comercios de comida rápida principalmente en pollerías, seguida de los centros comerciales. En una comparación de mediciones obtuvieron que los promedios de $PM_{2.5}$ en CHI superaron cuatro veces al Estándar de Calidad del Ambiental (ECA), mientras que HYO y UNCP superaron entre 12 y 9 veces al ECA.



5. Hipótesis

El sensor de partículas PMS5003 tiende a medir concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ que están por debajo o por arriba de las concentraciones que mide el equipo de referencia Temtop, pero, con una calibración adecuada usando modelos de regresión lineal y tomando en cuenta los sitios se pueden mejorar las mediciones.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México



6. Marco Teórico

6.1 Contaminación del Aire por Material Particulado

La presencia de contaminantes en la atmósfera representa un problema para el medio ambiente y la salud humana. En el aire existen partículas cuya composición proviene de fuentes naturales y antropogénicas. El material particulado deteriora la calidad del aire y afecta a los ecosistemas, razón por la que hay la necesidad de monitorear el aire con sensores que juegan un papel importante para facilitar la evaluación de tomas de decisiones y diseñar estrategias para mitigar el impacto que se produce.

Material Particulado

Es la mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire, cuya composición, tamaño y forma pueden variar significativamente. (US EPA, 2025). Las partículas contaminantes como las $PM_{2.5}$ se caracterizan por ser partículas finas con un diámetro menor a 2.5 micrómetros (μm), las PM_{10} son partículas que a diferencia de las $PM_{2.5}$ tienen un diámetro aerodinámico menor a 10 μm . En comparación con un cabello humano las PM_{10} son 7 veces más pequeñas y las $PM_{2.5}$ son diminutas, siendo 30 veces más pequeñas que un cabello. Su clasificación se basa en el tamaño aerodinámico y por su impacto en la salud (Instituto para la Salud Geoambiental, 2024). El material particulado (PM), se clasifica por su origen de emisión en primarias y secundarias. Son consideradas emisiones primarias las que son principalmente emitidas directamente por fuentes como el tráfico de los vehículos y comercios, mientras que emisiones secundarias, son consideradas así, por formarse en la atmósfera por reacciones químicas entre contaminantes gaseosos, la radiación solar y la humedad (Prana Air, 2022). La exposición al PM está asociada con enfermedades a la salud como las respiratorias, cardiovasculares y en casos prolongados, cáncer. El PM constituye uno de los principales contaminantes regulados a nivel mundial (Instituto para la Salud Geoambiental, 2024).



Fuentes de Emisión

Las fuentes de emisión se clasifican como fuentes puntuales, fuentes móviles, fuentes de área y fuentes naturales. Las fuentes móviles son aquellas responsables de emitir contaminantes a la atmósfera como resultado del funcionamiento de motores de combustión interna como los vehículos automotores. Estas emisiones se generan principalmente por el uso de combustible fósiles, liberando partículas y gases que afectan la calidad del aire, la salud humana y al medio ambiente. A diferencia de las fuentes puntuales, que permanecen fijas en un lugar específico como las industrias, las fuentes móviles se desplazan, lo que dificulta su control y monitoreo, convirtiéndolas en un factor de contaminación atmosférica. Las fuentes de área se caracterizan por ser actividades que en conjunto afectan la calidad del aire, y no se origina de un solo punto específico, sino que abarca una zona geográfica amplia, un ejemplo lo son el uso de madera y las actividades agrícolas, mientras que las fuentes naturales son emisiones que la naturaleza no puede controlar, pero es propiciado por desequilibrio ambiental, la erosión del suelo, océanos y volcanes (SEMARNAT, 2018).

Contaminantes Criterios

Son contaminantes que en México tienen una norma mexicana que establece límites máximos permisibles de concentraciones en el aire ambiente. Estos contaminantes criterios se liberan en grandes cantidades y son emitidos por una variedad de fuentes que resultan peligrosas para el medio ambiente y los seres humanos (COFEPRIS, 2017). La secretaria de salud es el órgano que a través de COFEPRIS evalúa los impactos de la contaminación atmosférica y establece los límites permisibles de concentración de los contaminantes en el aire (Fernández, 2021). Las normas oficiales mexicanas que establecen los límites máximos permisibles para los contaminantes criterios son las siguientes (COFEPRIS, 2017):

- NOM-025-SSA1-2021: PM₁₀ y PM_{2.5}
- NOM-020-SSA1-2021: Ozono (O₃)



- NOM-022-SSA1-2019: Dióxido de azufre (SO₂)
- NOM-023-SSA1-2021: Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- NOM-021-SSA1-2021: Monóxido de carbono (CO)
- NOM-026-SSA1-2021: Plomo (Pb)

En particular el monitoreo de partículas ha cobrado relevancia ya que la mortalidad y morbilidad de la población han sido indicadores de la presencia excesiva de las partículas y necesitan ser regulados (Tzintzun Cervantes et al., 2005). Son causantes de enfermedades crónicas, pulmonares y cardiovasculares, afectando directamente a los pulmones y al corazón. Científicos vincularon las muertes prematuras e infartos de medio cardiaco a la presencia de material particulado (US EPA, 2025).

Las partículas tienen un gran impacto en el medio ambiente ya que se transportan en el aire y viajan grandes distancias afectando a ecosistemas, el suelo y el agua; esto dependiendo de las fuentes que emiten y la composición química (US EPA, 2025). Las partículas pueden llegar a ser tóxicas en la atmósfera (DKV Seguros, 2025) y su excesiva presencia puede causar daños a materiales de edificios, incluyendo objetos de nivel cultural como estatuas o monumentos (US EPA, 2025).

La norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 establece criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida protección a la salud de la población. En esta norma se especifican los límites máximos permisibles y los cumplimientos graduales para la concentración de partículas de PM₁₀ y PM_{2.5} para la concentración promedio de cada 24 horas y anual, con plazo de uno, tres y cinco años a partir de su entrada a vigor en 2021. Para las concentraciones de PM₁₀, en un promedio de 24 horas, los límites se fijan en 70 µg/m³ durante el primer año, 60 µg/m³ en el tercer año y 50 µg/m³ al quinto; en promedio anual, los valores son de 36 µg/m³, 28 µg/m³ y 20 µg/m³, respectivamente. Mientras que para el caso de PM_{2.5}, el límite para 24 horas se establece en 41 µg/m³ en primer año, 33 µg/m³ en el tercer año y 25 µg/m³ en el quinto año; por lo que el promedio anual se



mantiene constante en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para todos los periodos. Las concentraciones se expresan en condiciones locales de temperatura y presión.

6.2 Arduino

La tecnología ha permitido el desarrollo de sensores que permiten medir parámetros del ambiente en suelo, agua y aire. Estos dispositivos se pueden programar usando plataformas o tarjetas electrónicas. Los sensores han permitido captar información precisa del entorno ambiental, como lo son la luz, la temperatura, la humedad y las partículas. Arduino es una de las plataformas más utilizadas para programación de sensores debido a su flexibilidad y la existencia de mucha información en línea para su ejecución y esto ha contribuido significativamente al desarrollo de dispositivos para el monitoreo ambiental.

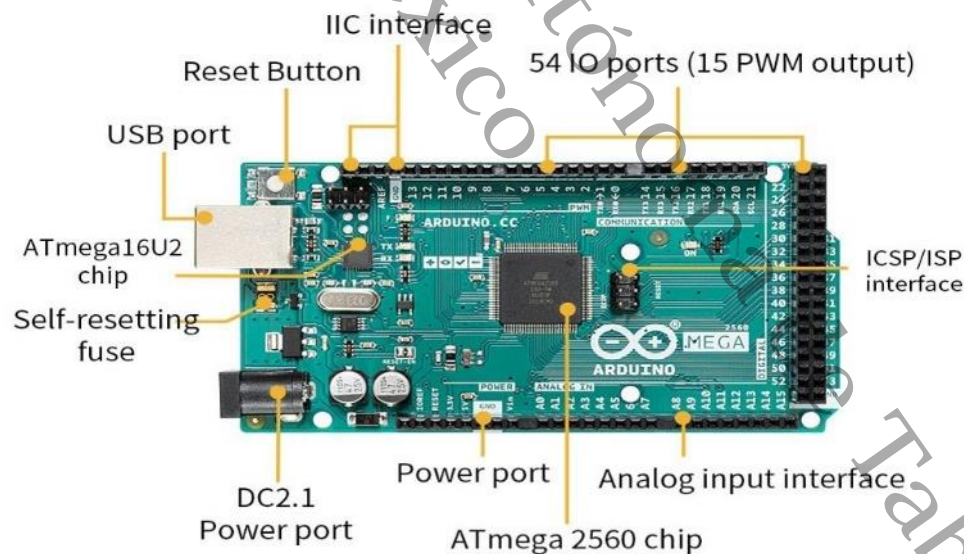
La Placa Arduino

Arduino es una tarjeta electrónica diseñada para la programación y control de diferentes módulos y sensores. Se considera hardware libre, y puede adaptarse a las necesidades, cumpliendo con nuevas expectativas (Muñoz, 2018). La placa de Arduino es fundamental, cuenta con todos los elementos de conexiones de entrada y salida para recibir o enviar instrucciones desde un microcontrolador que interpreta las lecturas en los sensores y escribe en los actuadores, convirtiendo la señal en energía (Fernández, 2024). En la actualidad existen diferentes tarjetas como lo son: Arduino uno, Arduino Uno r3, Arduino Leonardo, Arduino Nano, Arduino Lilypad, Arduino 101, Arduino Yún y Arduino Mega 2560, adaptándose a las necesidades del programador, cada una con diferentes características, y de bajo costo (Rsuagued, 2020).

Arduino Mega 2560 es una tarjeta de desarrollo que tiene más pines de entrada y salida que la tarjeta Arduino uno. Arduino Mega está diseñada para proyectos que requiera de más memoria y mayor capacidad de procesamiento. En la figura 1 se muestra

que tiene 54 entradas y salidas digitales (15 pueden usarse como salidas PWM (Pulse Width Modulation) permite controlar dispositivos con pines digitales variando el tiempo de la señal de encendido/apagado), cuenta con 16 entradas analógicas, 4 UARTS, conexión USB, un alimentador DC, conector ICSP y cristal 16 MHz. Programada con lenguaje Processing/Wiring, accesible para desarrollar comunicación interactiva desde una PC (Arduino.cl, 2025). Tiene la capacidad de conectar diferentes componentes electrónicos, puede conectarse a una variedad de fuentes de voltaje, puede almacenar y procesar numerosas cantidades de datos. Gracias al puerto serial es capaz de conectarse a la computadora, usando un cable USB, considerando este Arduino mega factible para realizar proyectos por su versatilidad (González, 2023). A diferencia del Arduino Uno, el Arduino Mega es más grande en tamaño de área y tiene más entradas y salidas de pines, memoria y potencia para procesar datos (Gudino, 2022).

Figura 1. Partes que conforman la Placa Arduino con microcontrolador modelo ATmega2560



Nota. Tomado de Arduino Mega 2560 Rev3, por Arduino (s. f.).

Arduino IDE

La plataforma de Arduino IDE fue principalmente creada para estudiantes con interés de aprender programación, y mediante una tarjeta electrónica controlar sensores que miden parámetros físicos, siendo una plataforma eficiente y accesible. (Muñoz, 2018). Es un software de acceso libre y puede descargarse de la siguiente dirección <https://www.arduino.cc/en/software/> (Yañez, 2025). La figura 2 muestra el aspecto de la ventana principal de este software. Su menú permite crear un nuevo código de programas, verificar que el código este correctamente escrito y cargarlo a una placa que previamente se conecta a la computadora y que se configura la conexión con el software. La ventana principal cuenta con una ventana de edición y un área conocidos como monitor serial para visualizar las mediciones que se están realizando de los sensores que estén conectados a la placa (Yañez, 2025). El software está disponible para diferentes sistemas operativos como Windows, Mac OS y GNU/Linux (Bañuelos Saucedo et al., 2022).

Figura 2. Descripción de la Pantalla principal del Arduino IDE versión 2.3.6 con programa abierto



Nota. Elaboración propia.



6.3 Sensores de Bajo Costo

Los SBC son dispositivos electrónicos compactos, económicos y portátiles. Estos dispositivos han mejorado y en la actualidad existen sensores para medir diversos parámetros en el aire ambiente. El costo de estos sensores es mucho menor cuando se comparan con el costo de un equipo de referencia que miden los mismos parámetros ambientales. Son de fácil disponibilidad, encontrándolos en tiendas en línea a precios accesibles. La mayoría de estos sensores son compatibles con la tarjeta de Arduino uno, esto significa que pueden configurar mediante programación para que la tarjeta de Arduino uno interprete las lecturas de medición. Los sensores para monitoreo ambiental son variados y con ellos se pueden medir diversos parámetros como la temperatura, humedad relativa del aire, la concentración de gases como el CO, CO₂ o la concentración de partículas como las PM₁₀ y PM_{2.5} (Cornner et al., 2017). Los SBC se presentan como una alternativa ideal para el monitoreo y existen muchos estudios que se enfocan en la sustitución de SBC a sensores de alto costo (US EPA, 2025).

Los sensores de partícula permiten medir concentraciones de partículas en el aire, como son las partículas finas, sólidas o líquidas. Son dispositivos que usan técnicas para poder detectar las PM y cuantificarlas según su categoría y clasificación (Mkt, 2023). La presencia de partículas como polvo, PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, contaminantes del aire en entornos cerrados y exteriores puede detectarse mediante sensores específicos como los sensores infrarrojos que permiten medir las concentraciones de contaminantes que se encuentran dispersos en la atmósfera, cada uno con diferentes características y técnicas de medición, son los principales tipos de sensores para monitorear partículas, de variedad y modelos, cada uno permitiendo medir distintos parámetros (Kunak Technologies S.L, 2025).



Sensor de Partículas PMS5003

Dentro los sensores más particulares se encuentra el modelo PMS5003, aunque hay otros como el sensor PMSDS011, sensor de polvo Gp2y1010au0f. Este sensor mide la concentración de partículas del aire $PM_{2.5}$ y PM_{10} por el método de detección por infrarrojo (Intecx, 2025) para adaptar este sensor a una estación de monitoreo es necesario programarlo en la plataforma de Arduino IDE adaptándolo a una tarjeta con microcontroladores (Geek Factory, 2025). La figura 3 muestra el aspecto físico del sensor y los pines de conexión principales. Su funcionamiento se basa principalmente en la detección de la luz dispersa con la finalidad de determinar la calidad del aire. Este sensor usa el protocolo de comunicación UART, el término viene de Universal Asynchronous Receiver-Transmitter. Vía este tipo de comunicación los datos se convierten a una secuencia de bits y se transmite o recibe a cierta velocidad. Afortunadamente existen librerías que configuran al sensor para que el usuario no experto tenga que lidiar con estos protocolos de comunicación (UNIT Electronics, 2025a).

Figura 3. Partes del Sensor PMS5003



Nota. PMS5003 Sensor de calidad de aire $PM_{2.5}$, por UNIT Electronics (2025a).

Sensor de Partículas PM-SDS011

Es un sensor digital que mide la concentración de partículas en el aire por el método de detección de infrarrojo. Este sensor está enfocado en determinar la concentración de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , tiene un ventilador incorporado para que el aire fluya hacia el interior y pase por el detector. En la figura 4 se muestra un sensor con los cables de conexión y un adaptador USB-UART que permite usarlo directamente con la computadora. Además de ser preciso, cuenta con una resolución de $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y respuesta rápida de 10 segundos (UNIT Electronics, 2025b). La forma que tiene este sensor para detectar las partículas es cuando estas están en suspensión en el aire y son captadas por el ventilador interno del sensor y este impulsa el aire exterior al interior de una cámara donde se emite un haz de luz. La luz es captada por un fotodiodo y la intensidad de luz dependerá del tamaño y la cantidad de la partícula. Finalmente, el sensor determina el procesamiento de la señal de dispersión de luz y detecta la concentración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su tamaño ha sido destacado como uno de los sensores de mayor precisión y de buena calidad (Prometec, 2023)

Figura 4. Sensor de Partículas SDS011



Nota. Sensor de partículas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , por Nova Fitness (s.f.).

Sensor de Polvo GP2Y1010AU0F

Sensor que permite medir concentraciones de partículas especialmente polvo y humo, que se encuentran dispersos en el aire ambiente. En la figura 5 se muestra el sensor de polvo, sus cables de conexión, una resistencia y un capacitador que son indispensable para su uso. El sensor mide las partículas de polvo por medio de un diodo infrarrojo y un fototransistor que puede detectar las partículas de polvo midiendo la dispersión de la luz que es reflejada, logrando generar datos de la densidad del polvo. Tiene la capacidad de ser práctico por sus dimensiones y peso, sencillo de instalar y dispone de una salida analógica, además es ampliamente utilizado en equipos de purificación de aire (Tutoriales, 2024). Es principalmente usado para sistemas de purificación de aire, no consume mucha energía eléctrica y cuesta al redor de \$200 pesos (Montoya, 2017).

Figura 5. Sensor de Polvo GP2Y1010AU0F



Nota. El sensor óptico GP2Y1010AU0F detecta partículas de polvo y humo en el aire por medio de luz infrarroja dispersada, por NovatronicE (s. f.).



6.4 Sensores de Temperatura y Humedad

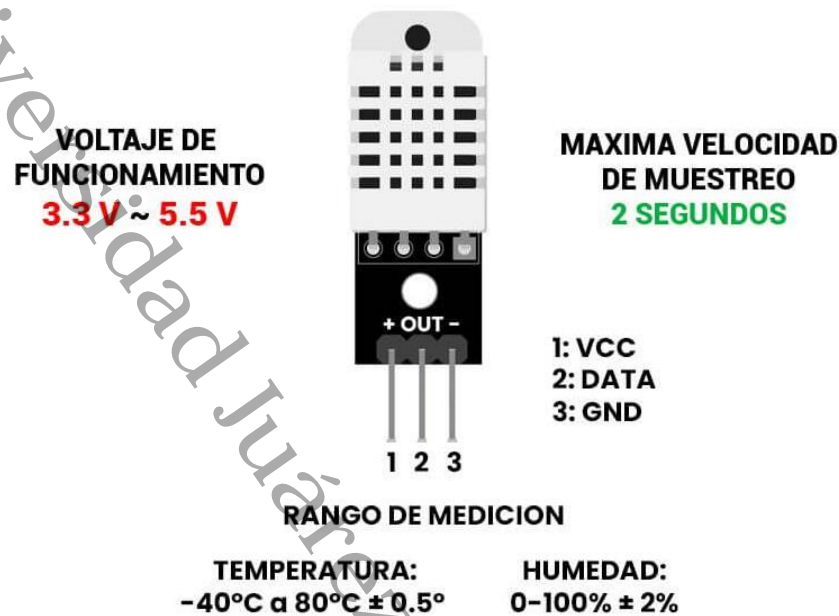
Generalmente, estos sensores tienen incorporado un sensor capacitivo para obtener datos de la humedad relativa en el aire y un termistor que permite obtener datos de temperatura, los cuales permiten medir las condiciones ambientales de forma precisa. Su funcionamiento se basa en transformar las variaciones de voltaje en lecturas de temperatura y humedad relativa del aire. Estos dispositivos electrónicos además de ser de bajo presupuesto están constituidos por un condensador sensible y un circuito de conversión que interpreta los cambios eléctricos en mediciones de humedad (Hengko, 2022).

Existen una variedad de sensores para medir estas variables, los más recomendados por su buen precio y accesibilidad son los: DHT22, DHT11, LM35 y MTH100 (Del Valle Hernández, 2020).

Sensor DHT22

SBC de buen funcionamiento que permite medir de manera digital la temperatura y la humedad relativa. Dicho sensor está compuesto por un capacitador de humedad y un termistor. No cuenta con salidas analógicas y utiliza las plataformas como Arduino, Raspberry entre otras para poder ser programado a nivel de software como de hardware. En la figura 6 se muestra la estructura del sensor y los pines de conexión. Dispone de librerías que permiten facilitar el uso de software, una alimentación VCC que se admite conectar a 3.3 y 5 V, GND para tierra y un pin de comunicación digital. Para la generación de nuevos datos es necesario esperar cada dos segundos. Ofrece una mejor resolución en comparación ante otros sensores como el DHT11, destacando por su precisión y su presentación es más robusta (UNIT Electronics, 2025c).

Figura 6. Sensor DHT22, para medir variables de temperatura y humedad relativa

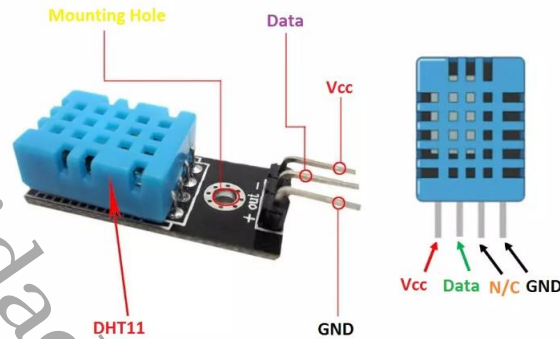


Nota. Tomado de DHT22 (AM2302) digital temperature and humidity sensor datasheet, por Aosong Electronics (s. f.).

Sensor DHT11

Es un sensor que también permite medir la temperatura y humedad relativa del aire, destacando por su estabilidad y alta fiabilidad gracias a su señal calibrada. En la figura 7 se presentan dos versiones de este sensor: en la figura de la izquierda, se muestra una versión que tiene un PCB (placa de circuito impreso, que sirve para montar y conectar los componentes electrónicos de manera organizada), y a la derecha, una versión sin PCB, que cuenta con cuatro pines: VCC, I/O, NC y GND, la versión de la izquierda que cuenta con PCB tiene solo tres pines: GND, DATA y VCC (Del Valle Hernández, 2021). Es un SBC fácil de usar, aunque es menos preciso que el DHT22 debido a su rango de operación que es más limitado. Además, recibe datos nuevos cada dos segundos y se debe proteger de la luz directa del sol, de igual manera no cuenta con salidas analógicas (AV Electronics, 2025).

Figura 7. Sensores DHT11 con PCB y sin PCB

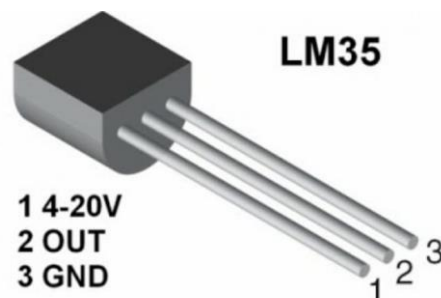


Nota. Tomado de Sensores DHT11 con PCB y sin PCB, Google Imágenes (s. f.).

Sensor LM35

Es un dispositivo que mide la temperatura, es accesible, fácil de usar y preciso. Su estructura es más pequeña, cuenta con solo tres pines de conexión y salida analógica (figura 8). Puede obtener datos de temperatura desde los -55°C hasta de 150°C lo que permite que este sensor sea aplicable en distintos entornos ya que sus dimensiones reducidas facilitan la instalación en cualquier lugar (UNIT Electronics, 2025). La medición de temperatura se obtiene por medio de las mediciones de su resistencia eléctrica (Llamas, 2015). Se alimenta de una fuente de energía de 5V. Tiene una precisión de $\pm 0.5^{\circ}$ Celsius (UNIT Electronics, 2025d).

Figura 8. Partes del Sensor LM35



Nota. Tomado de Partes del sensor LM35, Google Imágenes (s. f.).



7. Metodología

En este apartado se presenta la metodología seguida para el desarrollo del sistema emisor-receptor y el monitoreo de parámetros ambientales para cumplir con los objetivos de este trabajo. Esta investigación es de carácter experimental y aplicado aborda el monitoreo de parámetros del ambiente desde una perspectiva novedosa. La construcción y calibración de un sistema de monitoreo a partir de sensores de bajo costo. También es de carácter descriptivo pues genera los primeros datos que dan una idea de los niveles de fondo de los parámetros ambientales en DACBIOL, sobre todo en el aire ambiente exterior.

7.1 Área de Estudio

Este trabajo se realizó en las instalaciones de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (Figura 9). La DACBIOL se ubica a un costado de la carretera Villahermosa -Cárdenas, la cual presenta alto flujo vehicular. También se ubica a un costado de la carretera Bosques de Saloya que es de menor flujo. Dentro de la DACBIOL solo hay actividades de construcción por temporada, pero de manera frecuente hay emisiones atmosféricas por uso del estacionamiento y cocinas económica para la alimentación de la comunidad estudiantil. Este trabajo se realizó en tres sitios dentro de la división. El primer sitio fue el Laboratorio de Calidad del Aire y Desarrollo Tecnológico (LCADT) ubicado en el área de los cocodrilos, el segundo sitio fue la cafetería “el Graduado” y finalmente el tercer sitio fue el estacionamiento, donde los estudiantes, docentes y personal de la división pueden dejar de forma segura sus vehículos.

Figura 9. Área de Estudio



Nota. Los marcadores muestran la ubicación del LCADT (1), la cafetería (2) y el estacionamiento (3), sitios ubicados dentro de la DACBIOL. Imagen satelital de Google Earth, modificaciones propias 2025.



7.2 Materiales

En la tabla 1 se presentan los materiales y el costo unitario de cada componente que se utilizó para la construcción del equipo emisor-receptor con los que se midieron los parámetros de Temperatura (T), Humedad Relativa (HR) y las concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$. Algunos de los materiales ya se tenían disponibles en el LCADT, por ejemplo, las baterías portátiles, los Jumpers y los protoboard que se utilizaron para cada dispositivo. Para el desarrollo de los dos dispositivos electrónicos fue necesario la implementación de los módulos HC-05 para la comunicación de datos, siendo estos, una alternativa de buena comunicación a larga distancia, pudiendo medir aproximadamente hasta 16 metros. Para la determinación de datos de T y HR se seleccionó el sensor DHT22 debido a su precisión, capacidad de medir datos y precio accesible. Los datos de concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron registrados por el sensor PMS5003. Los dispositivos fueron conectados a una placa de Arduino Mega y para el registro de datos con fecha y hora se utilizaron un módulo SD y un reloj DS3131. La mayoría de los componentes fueron adquiridos en línea.



Tabla 1. Materiales y costos utilizados para cada dispositivo del sistema emisor-receptor

Materiales	Función	Cantidad	Precio Unitario	Subtotal
Arduino Mega	Emisor de datos de T, HR, PM10 y PM2.5	1	\$255	\$255
Arduino Mega	Receptor de datos del emisor y monitor de T, HR, PM10 y PM2.5	1	\$255	\$255
DHT22	Sensor de temperatura y humedad relativa	2	\$70	\$140
PMS5003	Sensor de partículas PM10 y PM2.5	2	\$500	\$1,000
HC-05	Comunicación bluetooth	2	\$135	\$270
Soporte de madera	Dispositivo portátil	2	\$100	\$200
Batería portátil	Dispositivo portátil	2	\$200	\$400
Tarjeta microSD	Almacenamiento de datos	1	\$200	\$200
Reloj DS3231	Registro de fecha y hora	1	\$90	\$90

El costo total de los materiales o componentes utilizados en el desarrollo completo del sistema emisor-receptor con comunicación vía Bluetooth y módulos fue de \$2810 pesos.



7.3 Diseño Electrónico del Sistema Emisor-Receptor

El diseño de este sistema consistió en dos dispositivos electrónicos. El dispositivo emisor está integrado por un Arduino Mega, un DHT22, un sensor PMS5003 y un módulo bluetooth HC-05. El dispositivo receptor contiene los mismos componentes que el emisor más un reloj de tiempo real modelo DS3231 para registro de fecha y hora y un módulo microSD para el aseguramiento de los datos.

El diseño del sistema consistió en un diagrama electrónico de conexión de los distintos componentes a la tarjeta Arduino Mega. Por lo tanto, se siguió el siguiente procedimiento para cubrir este objetivo y pasar a la fase de desarrollo:

- Se familiarizó con las características de la tarjeta Arduino Mega. Principalmente con sus pines de entrada/salida y sus funciones.
- Se familiarizó con los sensores DHT22, PMS5003 y los módulos SD, HC-05 y el reloj DS3231. Específicamente conociendo los pines para transmisión de datos y su funcionamiento. Para esto se consultó su hoja de trabajo o datasheet y se realizó una búsqueda en internet si las instrucciones en la hoja de trabajo no quedaron claras.
- Se investigó el protocolo de comunicación de los sensores y módulos. Los protocolos comunes son I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interfaz) y UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Conocer estos protocolos de comunicación permitió entender cómo un sensor se conecta un sensor a Arduino, y se puede programar en Arduino IDE.

Después de familiarizarse con el hardware del sistema se utilizó CircuitDesigner para la interconexión de los diversos componentes de hardware a Arduino Mega. Este software se implementó online (<https://app.circuitdesigner.com/>) y fue de mucha ayuda ya que consta de una lista extensa de componentes electrónicos para diseño de del sistema emisor-receptor. Otra de las ventajas de CircuitDesigner fue su capacidad de generar un



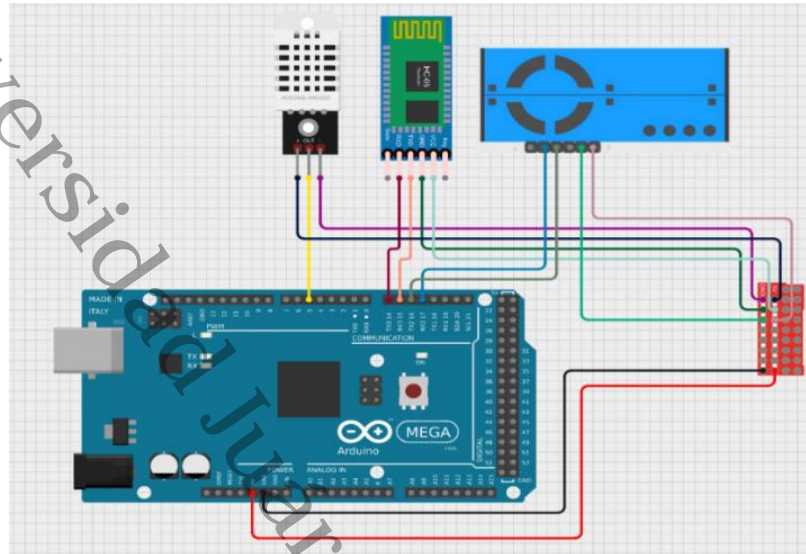
código de forma automática que se utilizó como un primer programa para controlar el dispositivo generado. Este programa se depuró y mejoró tomando como base otros ejemplos de programas sugeridos en tutoriales disponibles en internet.

La figura 10 muestra el diagrama electrónico del hardware del dispositivo emisor y la figura 11 muestra el diagrama electrónico del receptor. Ambas figuras son una vista del aspecto electrónico de cada dispositivo en la realidad.

Con el fin de comprender el diagrama electrónico tanto del emisor como del receptor correspondiente a las figuras 9 y 10, en las tablas 2 y 3 se detallan las conexiones para cada sensor y sus módulos correspondientes.

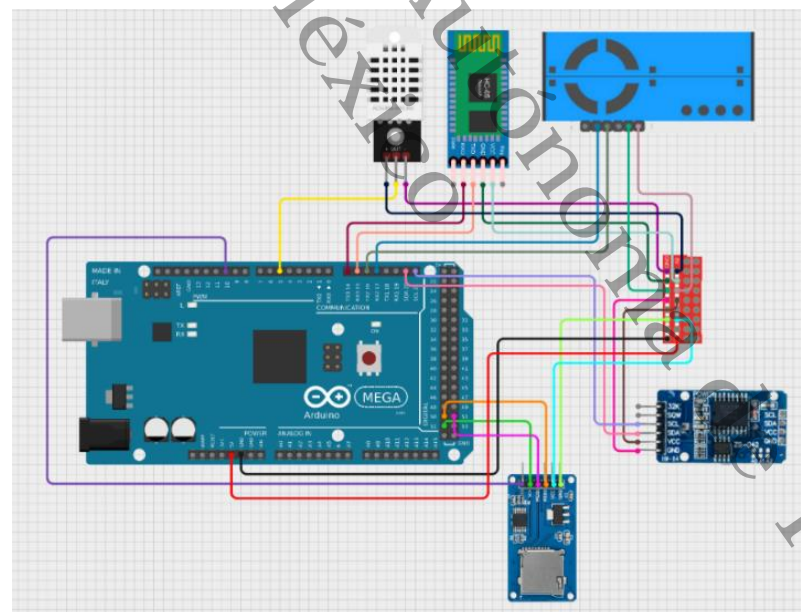
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México

Figura 10. Diagrama de conexión electrónico del emisor



Nota. Diseño electrónico propio en Cirkuit Designer.

Figura 11. Diagrama de conexión electrónico del receptor



Nota. Diseño electrónico propio en Cirkuit Designer.



Tabla 2. Conexiones de pines realizados para el emisor con la placa Arduino Mega

Arduino Mega	DHT22	HC-05	PMS5003
Pin GND	Pin GND	Pin GND	Pin GND
Pin VCC	Pin 5V	Pin 5V	Pin 5V
OUT	Pin 5		
Pin RX-2			Pin TX-2
Pin TX-2			Pin RX-2
Pin RX-3		Pin TX-3	
Pin TX-3		Pin RX-3	

Nota. Elaboración propia de tabla de conexión de pines.

Tabla 3. Conexiones de pines realizados para el receptor con la placa Arduino Mega

Arduino Mega	DHT22	HC-05	PMS5003	Reloj DS3231	microSD
Pin GND	Pin GND	Pin GND	Pin GND	Pin GND	Pin GND
Pin VCC	Pin 5V	Pin 5V	Pin 5V	Pin 5V	Pin 5V
OUT	Pin 5				
Pin RX-2			Pin TX-2		
Pin TX-2			Pin RX-2		
Pin RX-3		Pin TX-3			
Pin TX-3		Pin RX-3			
CLS				Pin CLS	
SDA				Pin SDA	
MISO					Pin 50
MOSI					Pin 51
SCK					Pin 52
CS					Pin 10

Nota. Elaboración propia de tabla de conexión de pines.

El diseño de los diagramas de conexión electrónico del emisor-receptor y tablas de conexión de pines de los sensores a Arduino Mega permitieron cumplir con el primer objetivo específico de este trabajo.



7.4 Desarrollo de los Dispositivos Electrónicos con SBC

Una vez definido el diseño del sistema emisor-receptor, se procedió con su desarrollo. Para esta etapa se adquirió de los materiales descritos en la tabla 1. El desarrollo del sistema se llevó a cabo siguiendo el procedimiento que se describe a continuación:

- Se desarrolló el dispositivo emisor de datos. Se utilizaron cables jumpers para la conexión electrónica siguiendo el diagrama de la etapa de diseño. En particular, el módulo HC-05 para este dispositivo funcionó como esclavo, es decir, que esperó que el dispositivo receptor se conectara a él.
- Se desarrolló el dispositivo receptor de datos. Los sensores y módulos se conectaron siguiendo el diagrama electrónico de la etapa de diseño como en el emisor. Sin embargo, en este caso, el módulo HC-05 se configuró como maestro, es decir, este módulo inició la conexión. Por default estos módulos vienen configurados como esclavo.
- Para la configuración, el HC-05 se conectó al Arduino Mega y este a la computadora mediante un cable USB tipo A-B. Se empleó el software Arduino IDE para la configuración. Mediante este software se cargó un programa que permitió la comunicación mediante comandos AT entre la computadora y el HC-05 y el monitor serie del software.
- Una vez que se programó el emisor, por ejemplo, se probó que funcionará correctamente con un teléfono celular con sistema Android. En esta etapa de prueba el teléfono operó como el receptor.
- Una vez que se cargó el programa del receptor, se comprobó que el receptor generará datos y que estos se guardarán en la tarjeta microSD del módulo SD.



7.5 Programación de los Dispositivos

Finalmente se programó el receptor para que recibiera y registrara tanto los datos del emisor como los datos del receptor y generara una base de datos formatos CSV. La NOM-025-SSA1-2021 establece que la medida de concentraciones de partículas deberán ser cada minuto. Por este motivo, el programa para el control de los sensores se ajustó para que lea cada minuto las variables de interés. La programación de los dispositivos emisor-receptor se realizó en la plataforma de software libre de Arduino IDE versión 2.3.6 disponible para su descarga en <https://www.arduino.cc/en/software/>.

El desarrollo del software se centró en la correcta comunicación entre los módulos y el microcontrolador Arduino Mega 2560, garantizando la lectura, transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real. La tabla 5 y 6 muestra los códigos o programas del dispositivo emisor y del dispositivo receptor respectivamente. Ambos programas están divididos en cuatro partes:

- La parte 1 tiene que ver con librerías que se requieren para facilitar la configuración y lectura de los sensores.
- La parte 2 contiene la declaración de variables. Algunas de estas variables definen el pin al que se conectan los sensores. Por ejemplo, la instrucción o línea `#define DHTPIN 5`, indica que el sensor de temperatura DHT22 tiene su pin de datos conectado al pin digital número 5 de Arduino Mega.
- La parte 3 del programa define la función `setup()` que contiene instrucciones para inicializar los sensores. Por ejemplo, la línea `dht.begin()` inicializa o prepara al sensor DHT22 para las mediciones.
- Finalmente, la parte 4 define la función `loop()`. Esta función ejecuta un bucle y es aquí donde se toman las lecturas de los sensores y se registran los datos para su posterior análisis



Tabla 4. Estructura del Código del emisor en Arduino IDE

```
/*Emisor _ Esclavo _ Mega 2560*/
//Parte 1: Declaración de librerías
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <SPI.h>
#include <PMS.h>

//Parte 2. Declaración de Variables
float humedad, temperatura, PM1,PM25, PM10;
#define DHTPIN 5
#define DHTTYPE DHT22

DHT dht(DHTPIN,DHTTYPE);
PMS pms(Serial2);
PMS::DATA data;

//Parte 3. Inicialización de Sensores
void setup() {
  Serial3.begin(38400);
  dht.begin();
  Serial2.begin(9600);
}

//Parte 4. Medición y Registro de Datos
void loop() {
  humedad= dht.readHumidity();
  temperatura = dht.readTemperature();
  if (pms.read(data)) {
    PM1=data.PM_AE_UG_1_0;
    PM25=data.PM_AE_UG_2_5;
    PM10=data.PM_AE_UG_10_0;
    // Enviar humedad
    Serial3.write('H'); // Identificador de humedad
    Serial3.write((uint8_t *)&humedad, sizeof(float));
    // Enviar temperatura
    Serial3.write('T'); // Identificador de temperatura
    Serial3.write((uint8_t *)&temperatura, sizeof(float));
    //Enviar PM10
    Serial3.write('C'); // Identificador de temperatura
    Serial3.write((uint8_t *)&PM25, sizeof(float));
    //Enviar PM25
    Serial3.write('D'); // Identificador de temperatura
```



```
Serial3.write((uint8_t *)&PM10, sizeof(float));  
delay(30000);  
}  
}
```

*Nota. Código del emisor con módulo HC-05 esclavo enviando datos al receptor.
Programación Propia en Arduino IDE 2.3.6*

Tabla 5. Código del receptor almacenando datos en tarjeta microSD

```
/*Receptor _ Maestro _ Mega 2560*/  
  
//Parte 1. Declaración de librerías  
#include <RTClib.h>  
#include <DHT.h>  
#include <SPI.h>  
#include <PMS.h>  
#include <SD.h>  
  
//Parte 2. Declaracion de Variables  
#define DHTPIN 5  
#define DHTTYPE DHT22  
#define SDpin 10  
float hume, teme, PM25e, PM10e; //Emisor  
float HR, Ta, PM1, PM25, PM10; //Receptor  
String fecha_hora;  
RTC_DS3231 rtc;  
File miarchivo;  
  
DHT dht(DHTPIN,DHTTYPE);  
PMS pms(Serial2);  
PMS::DATA data;  
  
//Parte 3. Inicialización de Sensores  
void setup() {  
  Serial3.begin(38400);  
  Serial2.begin(9600);  
  dht.begin();  
  rtc.begin();  
  pinMode(SDpin,OUTPUT);  
  SD.begin();  
  //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));  
}
```



```
miarchivo=SD.open("datospm.CSV",FILE_WRITE);
miarchivo.print("HRe");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("Te");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("PM25e");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("PM10e");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("HRr");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("Tr");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("PM25r");miarchivo.print(",");
miarchivo.print("PM10r");miarchivo.print(",");
miarchivo.println("FechaHora");
miarchivo.flush();
}
//Parte 4. Medición y Registro de Datos
void loop() {
  if (pms.read(data)){
    DateTime now=rtc.now();
    fecha_hora = String(now.day()) + "/" + String(now.month()) + "/" +
String(now.year())+" "+String(now.hour()) + ":" + String(now.minute()) + ":" +
String(now.second());
    HR= dht.readHumidity();
    Ta= dht.readTemperature();
    PM1=data.PM_AE_UG_1_0;
    PM25=data.PM_AE_UG_2_5;
    PM10=data.PM_AE_UG_10_0;
    //miarchivo=SD.open("PMHT.CSV",FILE_WRITE);
    //Imprime a monitor serie lo del emisor
    char type = Serial3.read();
    if (type == 'H') {
      Serial3.readBytes((uint8_t *)&hume, sizeof(float));
    }else if (type == 'T') {
      Serial3.readBytes((uint8_t *)&tempe, sizeof(float));
    } else if (type == 'C') {
      Serial3.readBytes((uint8_t *)&PM25e, sizeof(float));
    }else if (type == 'D') {
      Serial3.readBytes((uint8_t *)&PM10e, sizeof(float));
      //Imprime a monitor serie lo del receptor
      miarchivo.print(hume);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(tempe);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(PM25e);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(PM10e);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(HR);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(Ta);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(PM25);miarchivo.print(",");
      miarchivo.print(PM10);miarchivo.print(",");
    }
  }
}
```



```
miarchivo.println(fecha_hora);  
miarchivo.flush();  
delay(30000);  
}  
//delay(30000); No funciona aquí  
}  
}
```

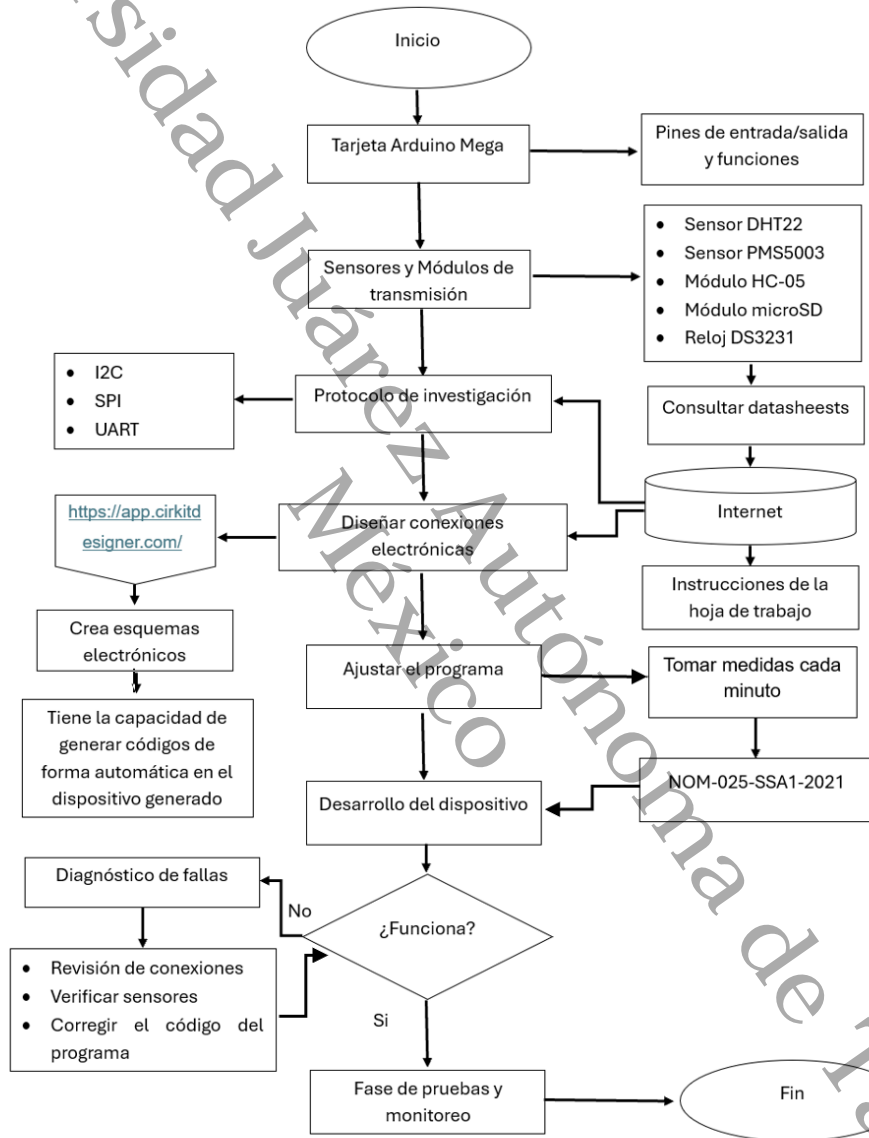
Nota. Código del receptor con módulo HC-05 maestro recibiendo datos del HC-05 esclavo. Programación Propia en Arduino IDE 2.3.6

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México



La figura 12 muestra el diagrama de flujo que se siguió para el diseño del sistema emisor-receptor. Tanto para su desarrollo como para su calibración y toma de datos.

Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología del diseño del emisor- receptor



Nota. El diagrama muestra los pasos de la metodología para el diseño y desarrollo del sistema emisor-receptor. Elaboración propia.



7.6 Calibración del Sistema Emisor-Receptor

Una vez que los dos dispositivos funcionaron correctamente, se calibraron los sensores de partículas. No se calibraron los sensores de temperatura y humedad porque en trabajos previos se ha demostrado su buena precisión. Para la calibración se utilizó como equipo de referencia el monitor marca Temtop que puede medir concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} en µg/m³ incluso cada minuto. El procedimiento que se siguió para la calibración abarcó tres etapas:

Etapa 1. En esta etapa se tomaron lecturas simultáneas cada 30 segundos de la concentración de partículas con los dos dispositivos y el Temtop en tres sitios diferentes: La cafetería de la escuela, el estacionamiento y el exterior del laboratorio de la Calidad del Aire y Desarrollo Tecnológico. Estos sitios se seleccionaron como representativos porque difiere la afluencia de estudiantes. El monitor no tiene data logger de modo que el registro de sus lecturas fue de manera manual. El periodo de monitoreo fue del 8 al 22 de septiembre, con duración de tres o hasta cuatro horas.

Etapa 2. Esta etapa se dio inicio con un análisis de correlación entre la concentración de partículas del PMS5003, el Temtop, la temperatura y humedad del aire. Se determinaron por lo tanto el coeficiente de correlación de Pearson, r_{xy} (Ecuación 1) y prueba de significancia, esto es, si existe evidencia significativa de que su valor es distinto de cero.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Después de la determinación de los coeficientes de correlación, se ajustaron modelos de regresión lineal simple o múltiple del tipo que muestran las ecuaciones 2 y 3.



$$y_{temtop} = \beta_1 + \beta_2 x_{pms} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$y_{temtop} = \beta_1 + \beta_2 x_{pms} + \beta_3 x_T + \beta_4 x_{HR} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde x_{pms} , x_T , x_{HR} representan la concentración de partículas PM_{10} o $PM_{2.5}$, la lectura de temperatura y humedad relativa respectivamente. Los β_i 's son parámetros del modelo que se determinaron usando la técnica de los mínimos cuadrados. Para evaluar el desempeño de los modelos se usó el coeficiente de determinación (R^2) dado por las ecuaciones 4 y 5, el error medio absoluto (MAE por sus siglas en inglés) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) dado por las ecuaciones 8 y 9. La ecuación 4 es el valor de la R^2 para un modelo de regresión lineal simple y es simplemente el cuadrado del coeficiente de correlación. La ecuación 5 es la definición más general de calcularlo incluso con modelos de regresión lineal múltiple. SCT es la suma de errores de cuadrado totales y SCE es la suma de cuadrados de los residuales. Se seleccionaron las curvas de calibración que obtuvieron un R^2 grande (0.90) y un MAE y RMSE pequeño. En algunos casos se recurrió al ajuste visual. Es decir, se seleccionaron curvas que ajustaron bien los datos a los extremos.

$$R^2 = r_{xy}^2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$SCT = \sum (y_{pms} - \bar{y}_{pms})^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$SCE = \sum (y_{pms} - y_{regresion})^2 \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |y_{Temtop} - y_{regresion}| \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_{Temtop} - y_{regresion})^2} \quad (\text{Ecuación 9})$$

(Montgomery et al., 2006)



Para obtener los parámetros de los modelos de las ecuaciones 2 y 3, primero se exportaron los datos a RStudio. La columna de datos correspondiente al equipo Temtop se llamó PM_{10t} y la columna correspondiente a PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidos por el sensor PMS5003 se llamó PM_{10e} y $PM_{2.5e}$ o en lugar de una e una r para el receptor. Posteriormente se utilizó la función $lm()$ del paquete stats. La síntesis de esta función es $lm(datos, formula)$. Por ejemplo, para un modelo de regresión lineal simple se utilizó: $lm(datos=misdatos, formula= PM_{10t} \sim PM_{10e})$. Para un modelo cuadrático se utilizó: $lm(datos=misdatos, formula= PM_{10t} \sim PM_{10e} + I(PM_{10e}^2))$. Finalmente, con la función $summary()$ se obtuvieron las pruebas de hipótesis correspondientes para los parámetros del modelo.

Etapa 3. En esta etapa, la curva de calibración de cada sensor se incluyó en el programa del emisor y receptor respectivamente.

En conclusión, este objetivo finalizó con dos dispositivos electrónicos, físicamente parecidos pero diferentes en funciones. El sistema se calibró para medir concentraciones de partículas. Donde estuvo, midiendo, enviando, recibiendo y asegurando datos para cubrir el objetivo final de este proyecto.

7.7 Generación de Datos de Partículas, Temperatura y Humedad Relativa

En esta etapa se utilizó el sistema emisor-receptor ya calibrado para generar datos de temperatura ($^{\circ}C$), humedad relativa (%) y concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ del aire ($\mu g/m^3$). El monitoreo se realizó en tres sitios diferentes al interior de la DACBIOL:

- En el primer sitio, el receptor estuvo ubicado en el interior del LCADT y el emisor en el exterior. Los separó una ventana de vidrio.
- En el segundo sitio, tanto el receptor como el emisor se ubicaron al interior de la cafetería de la escuela a una distancia aproximada entre sí de 9 m.
- En el tercer sitio, tanto el receptor como el emisor se ubicaron en un espacio abierto en el estacionamiento de la DACBIOL separados por una distancia de 16 m.



Los días de monitoreo al interior de la cafetería fueron 8, 23 y 26 de septiembre y 7 de octubre. En el estacionamiento los días fueron 9, 18 y 22 de septiembre. El LCADT se monitoreo desde el 22 de agosto y se dejó en este sitio de forma permanente. El análisis de los datos consistió en:

- La generación de un resumen estadístico de cada variable en el periodo de muestreo por cada sitio. Dicho resumen incluyo los valores máximos y mínimos, media, mediana y desviación estándar.
- Graficas de cajas para comparar los datos del emisor con los del receptor.
- También se calcularon los intervalos de confianza del 95% de la mediana. Si estos intervalos no se interceptan se concluirá de que existe diferente significativa entre los puntos de muestreo para esa variable entre los dos puntos de monitoreo.
- Con suficientes datos, se estableció la tendencia horaria de los cuatro parámetros medidos. Con esta tendencia se determinó en qué momento del día estas variables alcanzan sus valores máximos o mínimos.

Todo el análisis estadístico se realizó con el software RStudio, ya que este software cuenta con funciones programadas para generar modelos de regresión lineal múltiple y pruebas de hipótesis correspondientes, facilitando el análisis estadístico y reduciendo el tiempo de trabajo.



8. Resultados

Esta sección muestra los resultados obtenidos de este trabajo, se presenta el aspecto físico del sistema emisor-receptor. Se visualizan las curvas de calibración en forma gráfica y matemática, y un análisis estadístico del monitoreo realizado en tres sitios dentro de la DACBiol.

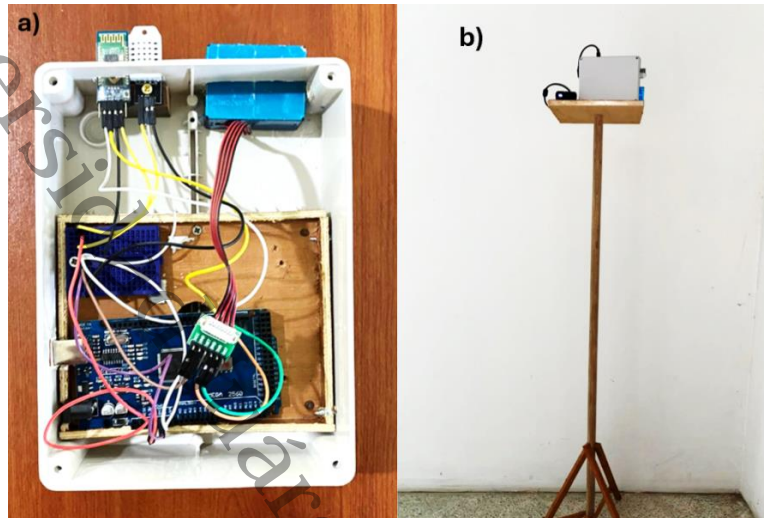
8.1 Desarrollo del Hardware del Sistema Emisor-Receptor con SBC

Las figuras 13 y 14 muestran la estructura del hardware del sistema emisor-receptor: en (a) se presenta la conexión física, y en (b) se presenta encapsulado en una caja de plástico con un tripié para que funcione de manera portátil. De modo portátil los equipos se alimentan con un una power bank pero también es posible conectarlos a un tomacorriente de 110V utilizando un eliminador. Los sensores y módulos (PMS5003, DHT22 y HC-05) se instalaron en un costado de la caja plástica por seguridad y limpieza durante el funcionamiento. A diferencia de un equipo convencional (Temtop), este sistema tiene la ventaja de registrar datos cada 30 segundos en una memoria SD, además, de la disponibilidad, accesibilidad y bajo costo de los materiales que hace que sea más fácil la construcción de los equipos.

En la figura 15 se presenta el sistema emisor-receptor y el equipo de referencia Temtop operando en la etapa de calibración y registrando datos en: a) LCADT, b) Cafetería y C) Estacionamiento. El equipo emisor-receptor midió con una frecuencia de 30 segundos, la temperatura en ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa en (%) y las concentraciones de partículas PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

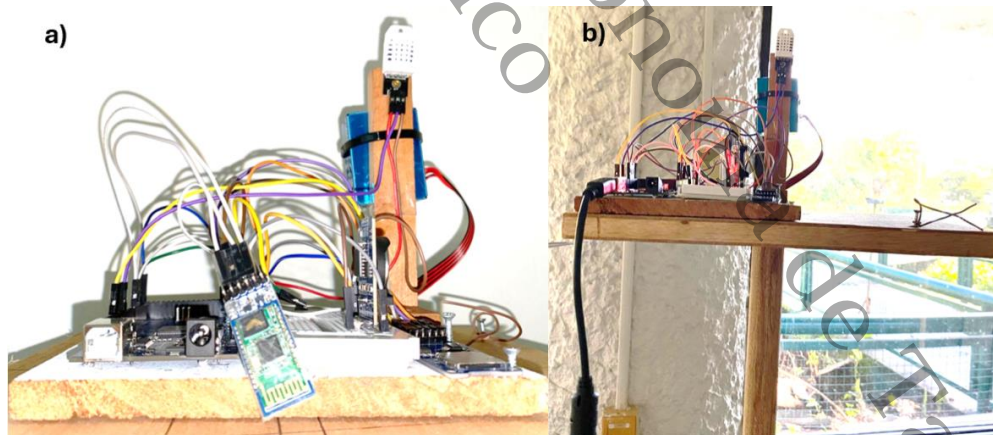


Figura 13. Diseño y Estructura Final del Equipo Emisor. En el inciso a) Configuración interna del equipo emisor; b) Montaje del equipo portátil



Nota. Montaje de sensores a la tarjeta Arduino Mega 2560, del equipo Emisor. Imagen Propia.

Figura 14. Diseño y Estructura Final del Equipo Receptor. En el inciso a) Estructura interna del equipo Receptor, b) Montaje del equipo portátil



Nota. Sensores y módulos que integra el equipo Receptor como maestro. Imagen Propia.

Figura 15. Proceso de calibración del Equipo Emisor-Receptor vs Temtop en a) LCADT, b) Cafetería y c) Estacionamiento



Nota. Funcionamiento del sistema emisor-receptor en los sitios de muestreo, con un equipo de referencia para la calibración y obtención de datos. Imagen Propia.

8.2 Datos de Monitoreo para la Calibración del Sistema

La figura 16 muestra la tendencia del comportamiento de las concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ que midió el sistema emisor-receptor vs Temtop. Se observa que el sistema emisor-receptor midió concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ por encima del equipo Temtop con excepción del estacionamiento y de las partículas PM_{10} donde el sistema midió concentraciones de partículas PM_{10} por debajo del Temtop. La diferencia fue mayor cuando se midieron partículas $PM_{2.5}$ y menor cuando se midieron las concentraciones de partículas PM_{10} .

Siguiendo la tendencia de la mediana la concentración de $PM_{2.5}$ medidas en LCADT por el sistema emisor-receptor fue de $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que para el Temtop fue de $14.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La diferencia observada fue en promedio de $18.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a las PM_{10} el sistema emisor-receptor midió $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente cuando el Temtop registro $21.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La diferencia entre el sistema y el Temtop fue un poco mayor a $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la cafetería la concentración $PM_{2.5}$ medida por el sistema emisor-receptor fue de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el equipo emisor y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el receptor, mientras que el Temtop registro $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a las concentraciones de PM_{10} el emisor midió $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el receptor y $22.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el

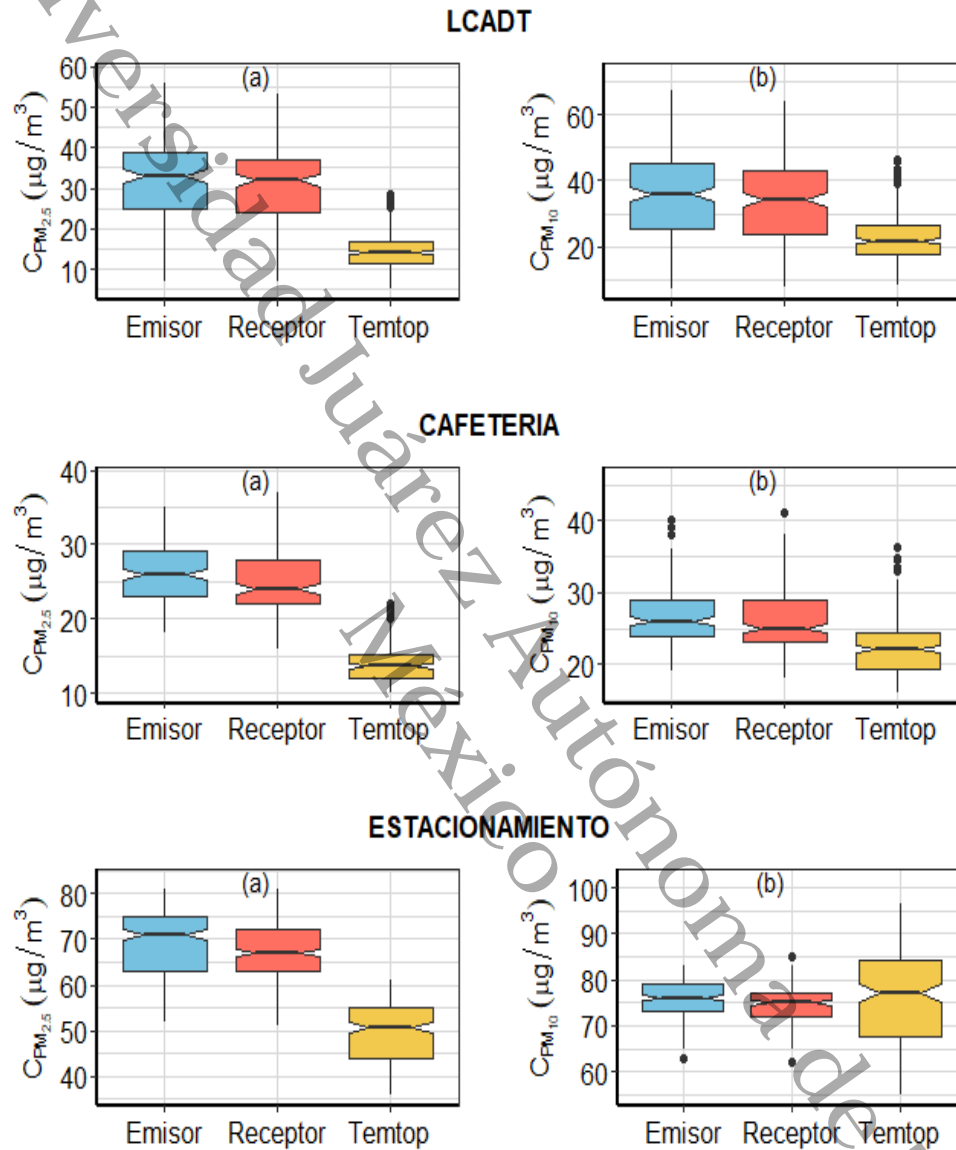


Temtop. En el estacionamiento las concentraciones de $PM_{2.5}$ del sistema emisor-receptor fueron $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para el Temtop fue $50.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La diferencia observada fue $20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de PM_{10} fueron de $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el emisor, $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el receptor y $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el del Temtop. Con diferencias de entre 1 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre el sistema y el Temtop.

En lo que respecta a la variabilidad, en los tres sitios de muestreo el sensor PMS5003 presento mayor variabilidad en las medidas de concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ que las medidas por el equipo Temtop. En el LCADT el sistema emisor-receptor tuvo una desviación estándar en las concentraciones de $PM_{2.5}$ de $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para el Temtop fue $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La diferencia observada fue de $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para las concentraciones de PM_{10} la desviación estándar fue de $13.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el emisor, $12.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el receptor y $7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el Temtop. Se aprecia que existe una diferencia entre $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la cafetería las desviaciones de $PM_{2.5}$ medias por el sistema emisor-receptor fueron de, $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, y $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del Temtop. La diferencia observada fue de aproximadamente $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para las PM_{10} la desviación fue de $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambos equipos y para el Temtop $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La diferencia observada fue mínima con un valor de $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el estacionamiento la desviación de partículas $PM_{2.5}$ medidas por el sistema emisor-receptor fue de $7.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que por el Temtop fue de $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Donde se observa una diferencia de $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del emisor vs Temtop y $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del receptor vs Temtop. Por otra parte, para las PM_{10} el sistema midió $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del emisor y $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por el receptor, mientras que el Temtop registro $10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Observando una diferencia de aproximadamente $6.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del Temtop con respecto al sistema emisor-receptor.

En general, la comparación de los tres sitios muestra variaciones significativas en las concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ registradas por los equipos emisor-receptor y el equipo de referencia Temtop. Esto evidenció la necesidad de calibrar el sensor PMS5003 de cada equipo, mediante modelos de calibración según las características de cada sitio.

Figura 16. Gráficas de Caja y Bigote, para LCDAT, Cafetería y Estacionamiento. Comparando Datos del Sistema Emisor-Receptor vs Temtop



Nota. La imagen presenta los datos calibrados por el sistema emisor-receptor en los sitios de muestreo, comparando los datos obtenidos con los del equipo de referencia Temtop. Elaboración propia en RStudio.



8.3 Generación de Curvas de Calibración del Sistema con Monitor de Referencia

Las curvas de calibración que mejor se ajustaron en cada sitio de muestreo se presentan en las tablas 6 y 7. La tabla 6 muestra los modelos de calibración de cada sitio correspondientes a las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} del equipo emisor. La tabla 7 muestra las curvas de calibración de las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} del receptor. En las ecuaciones, las variables indicadas como $pm10_{cal}$ y $pm2.5_{cal}$ representan los valores de concentración de partículas corregidos, y las variables $pm10_e$, $pm2.5_e$, $pm10_r$ y $pm2.5_r$ representan las concentraciones medidas por los sensores PMS5003 integrados a cada equipo del sistema. Algunos de los modelos incluyeron la temperatura y humedad relativa como variables predictoras.

En la tabla 8 se presentan un resumen de los tres indicadores de desempeño para los modelos obtenidos y por cada sitio: el coeficiente de determinación R^2 , el promedio de los errores medio absolutos entre los valores observados y predichos MAE y la raíz del error cuadrático medio RMSE. Se analizó cada modelo y seleccionaron los que cumplen con el MAE y RMSE más bajo. Estos se indican en la tabla 8 con un asterisco (*). Los modelos seleccionados se visualizaron gráficamente para propósitos de comparación. Algunos modelos se seleccionaron, aunque su R^2 no fue el más bajo.



Tabla 6. Curvas de Calibración para $PM_{2.5}$ y PM_{10} del Emisor de cada Sitio

Sitio	Modelo	Curva de calibración
LCADT	1	$pm_{2.5_{cal}} = 0.45797 * pm_{2.5_e}$
	2	$pm_{2.5_{cal}} = 0.37498 * pm_{2.5_e} + 0.00204 pm_{2.5_e}^2$
	3	$pm_{2.5_{cal}} = 6.19658 + 0.007487 * pm_{2.5_e}^2$
	4	$pm_{2.5_{cal}} = -144.5251 + 2.3193 * T_e + 1.809 * HR_e$
	5	$pm_{2.5_{cal}} = 16.64799 - 0.52167 * T_e + 0.44923 * pm_{2.5_e}$
	6	$pm_{2.5_{cal}} = -10.62820 + 0.15020 * HR_e + 0.44578 * pm_{2.5_e}$
	7	$pm_{10_{cal}} = 0.63548 * pm_{10_e}$
	8	$pm_{10_{cal}} = 3.15210 + 0.55769 * pm_{10_e}$
	9	$pm_{10_{cal}} = 12.371136 + 0.007406 * pm_{10_e}^2$
	10	$pm_{10_{cal}} = -209.9457 + 3.3633 * T_e + 1.7427 * HR_e$
	11	$pm_{10_{cal}} = 16.54116 - 0.40172 * T_e + 0.53711 * pm_{10_e}$
CAFETERÍA	12	$pm_{2.5_{cal}} = 0.548743 * pm_{2.5_e}$
	13	$pm_{2.5_{cal}} = 6.9307040 + 0.0106073 pm_{2.5_e}^2$
	14	$pm_{2.5_{cal}} = -144.14524 + 3.93270 * T_e + 0.82527 * HR_e$
	15	$pm_{2.5_{cal}} = -65.14178 + 2.29356 * T_e + 0.50423 * pm_{2.5_e}$
	16	$pm_{10_{cal}} = 0.835826 * pm_{10_e}$
	17	$pm_{10_{cal}} = 2.39854 + 0.74977 * pm_{10_e}$
	18	$pm_{10_{cal}} = 12.76 + 0.01316 * pm_{10_e}^2$
ESTACIONAMIENTO	19	$pm_{10_{cal}} = -229.8991 + 6.2559 * T_e + 1.3269 * HR_e$
	20	$pm_{10_{cal}} = -87.63088 + 3.17050 * T_e + 0.69041 * pm_{10_e}$
	21	$pm_{2.5_{cal}} = 0.716358 * pm_{2.5_e}$
	22	$pm_{2.5_{cal}} = 22.69 + 0.005549 pm_{2.5_e}^2$
	23	$pm_{2.5_{cal}} = -67.03868 + 2.53243 * T_e + 0.55638 * pm_{2.5_e}$
	24	$pm_{2.5_{cal}} = 56.01076 - 0.59808 * HR_e + 0.50423 * pm_{2.5_e}$
	25	$pm_{10_{cal}} = 0.63548 * pm_{10_e}$
	26	$pm_{10_{cal}} = 3.15210 + 0.55769 * pm_{10_e}$
	27	$pm_{10_{cal}} = 12.371136 + 0.007406 pm_{10_e}^2$
	28	$pm_{10_{cal}} = -209.9457 + 3.3633 * T_e + 1.7427 * HR_e$
	29	$pm_{10_{cal}} = 16.54116 + -0.40172 * T_e + 0.53711 * pm_{10_e}$

Nota. Elaboración propia en RStudio con base a datos de monitoreo.



Tabla 7. Curvas de Calibración para $PM_{2.5}$ y PM_{10} del Receptor cada Sitio

Sitio	Modelo	Curva de calibración
LCADT	1	$pm_{2.5_{cal}} = 0.47355 * pm_{2.5_r}$
	2	$pm_{2.5_{cal}} = -0.89212 + 0.49969 * pm_{2.5_r}$
	3	$pm_{2.5_{cal}} = 0.3878364 * pm_{2.5_r} + 0.0023393 * pm_{2.5_r}^2$
	4	$pm_{2.5_{cal}} = 6.230829 + 0.007943 * pm_{2.5_r}^2$
	5	$pm_{2.5_{cal}} = -161.5236 + 2.5292 * T_r + 1.2217 * HR_r$
	6	$pm_{2.5_{cal}} = 6.39455 - 0.21871 * T_r + 0.48350 * pm_{2.5_r}$
	7	$pm_{10_{cal}} = 0.657548 * pm_{10_r}$
	8	$pm_{10_{cal}} = 3.1177 + 0.5782 * pm_{10_r}$
	9	$pm_{10_{cal}} = 0.7012398 * pm_{2.5_r} - 0.0010058 * pm_{10_r}^2$
	10	$pm_{10_{cal}} = 12.61 + 0.007730 * pm_{10_r}^2$
CAFETERÍA	11	$pm_{10_{cal}} = -230.5310 + 3.5877 * T_r + 1.7794 * HR_r$
	12	$pm_{2.5_{cal}} = 0.569539 * pm_{2.5_r}$
	13	$pm_{2.5_{cal}} = 1.31355 + 0.51798 * pm_{2.5_r}$
	14	$pm_{2.5_{cal}} = 7.64217 + 0.01031 * pm_{2.5_r}^2$
	15	$pm_{2.5_{cal}} = -118.4836 + 2.9033 * T_r + 0.8925 * HR_r$
	16	$pm_{2.5_{cal}} = -36.95447 + 1.46446 * T_r + 0.45704 * pm_{2.5_r}$
	17	$pm_{2.5_{cal}} = -14.68798 + 0.29459 * HR_r + 0.44748 * pm_{2.5_r}$
	18	$pm_{10_{cal}} = 0.869382 * pm_{10_r}$
	19	$pm_{10_{cal}} = 3.96608 + 0.72142 * pm_{10_r}$
	20	$pm_{10_{cal}} = 1.010150 * pm_{2.5_r} - 0.005077 * pm_{10_r}^2$
	21	$pm_{10_{cal}} = 13.67 + 0.01296 * pm_{10_r}^2$
	22	$pm_{10_{cal}} = -190.8056 + 4.7234 * T_r + 1.4137 * HR_r$
ESTACIONAMIENTO	23	$pm_{10_{cal}} = -74.9347 + 3.0018 * T_r + 0.6198 * pm_{10_r}$
	24	$pm_{10_{cal}} = -27.34499 + 0.56826 * HR_r + 0.60855 * pm_{10_r}$
	25	$pm_{2.5_{cal}} = 0.741286 * pm_{2.5_r}$
	26	$pm_{2.5_{cal}} = 23.68 + 0.005734 * pm_{2.5_r}^2$
	27	$pm_{2.5_{cal}} = -69.17989 + 2.93998 * T_r + 0.47057 * pm_{2.5_r}$
	28	$pm_{2.5_{cal}} = 96.81258 - 0.87540 * HR_r + 0.47418 * pm_{2.5_r}$
	29	$pm_{10_{cal}} = 1.029016 * pm_{10_r}$
	30	$pm_{10_{cal}} = -62.5195 + 1.8718 * pm_{10_r}$
	31	$pm_{10_{cal}} = -153.6325 + 4.9992 * T_r + 1.0979 * pm_{10_r}$
	32	$pm_{10_{cal}} = 127.35053 + 1.48076 * HR_r + 1.11115 * pm_{10_r}$
	33	$pm_{10_{cal}} = -230.5310 + 3.5877 * T_r + 1.7794 * HR_r$

Nota. Elaboración propia en RStudio con base a datos de monitoreo.



Tabla 8. Modelos de Calibración mostrando R^2 , MAE y RMSE de cada sitio

Sitio	EMISOR				RECEPTOR			
	Modelo	R^2	MAE	RMSE	Modelo	R^2	MAE	RMSE
LCADT	1	0.98	1.46	1.91	1	0.98	1.33	1.65
	2	0.98	1.21	1.56	2	0.89	1.36	1.63
	3*	0.90	1.21	1.56	3*	0.99	0.97	1.25
	4	0.27	2.94	4.28	4	0.93	0.97	1.25
	5	0.88	1.36	1.74	5	0.32	2.95	4.14
	6	0.87	1.37	1.76	6	0.89	1.34	1.69
	7*	0.98	2.41	3.06	7*	0.98	2.25	2.78
	8	0.86	2.17	2.87	8	0.89	1.99	2.56
	9	0.89	1.98	2.55	9	0.98	1.66	2.22
	10	0.26	4.57	6.64	10	0.91	1.70	2.31
	11	0.86	2.14	2.81	11	0.31	4.56	6.44
Cafetería	12	0.99	1.13	1.40	12	0.98	1.11	1.46
	13*	0.72	1.08	1.34	13	0.68	1.09	1.44
	14	0.46	1.44	1.88	14*	0.70	1.05	1.40
	15	0.76	1.02	1.24	15	0.49	1.40	1.82
	16	0.98	1.87	2.36	16	0.69	1.09	1.41
	17	0.69	1.85	2.32	17	0.69	1.09	1.42
	18*	0.71	1.79	2.27	18*	0.98	2.00	2.59
	19	0.43	2.43	3.17	19	0.65	1.82	2.39
	20	0.74	1.76	2.15	20	0.98	1.84	2.49
					21	0.64	1.86	2.52
Estacionamiento					22	0.46	2.35	3.07
					23	0.67	1.80	2.41
					24	0.67	1.83	2.43
	21*	0.99	1.13	1.40	25*	0.99	1.11	1.46
	22	0.68	1.08	1.34	26	0.55	1.05	1.40
	23	0.76	1.02	1.24	27	0.79	1.09	1.41
	24	0.74	1.13	1.39	28	0.79	1.09	1.42
	25	0.98	1.87	2.36	29	0.98	2.00	2.59
	26	0.86	1.85	2.32	30	0.49	1.84	2.49
	27*	0.89	1.79	2.27	31*	0.77	1.80	2.41
28	0.26	2.43	3.17	32	0.76	1.83	2.43	
29	0.86	1.76	2.15	33	0.30	2.35	3.07	

Nota. Elaboración propia con base de datos de modelos en RStudio.



Como se indicó anteriormente, en la tabla 8 se presentan los modelos que fueron elegidos por cada sitio. Para el sitio LCADT se seleccionaron los modelos 3 y 7 para calibrar las medidas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} respectivamente. El R^2 para las $PM_{2.5}$ fue de 0.90 en el emisor y de 0.99 en el receptor. En lo que respecta a las PM_{10} el R^2 fue de 0.98 para ambos. Los MAE y RMSE de los modelos fueron los mínimos. Por ejemplo, para el modelo 3- $PM_{2.5}$ -emisor fueron de 1.21 y 1.56 respectivamente y de 0.97 y 1.25 respectivamente para el modelo 3- $PM_{2.5}$ -receptor.

La figura 17 muestra los modelos seleccionados para calibrar las concentraciones de $PM_{2.5}$ Y PM_{10} en el LACDT. Para la $PM_{2.5}$ se seleccionó el modelo 3 tanto para el emisor como para el receptor. Este es un modelo cuadrático, sin el termino lineal para el emisor y cuadrático sin el termino constante para el receptor. Su R^2 correspondiente fue de 0.90 y 0.99. Para calibrar las concentraciones de PM_{10} se escogió el modelo 7 que es un modelo de línea recta sin ordenada del origen. Su R^2 fue de 0.98 tanto para el emisor como para el receptor.

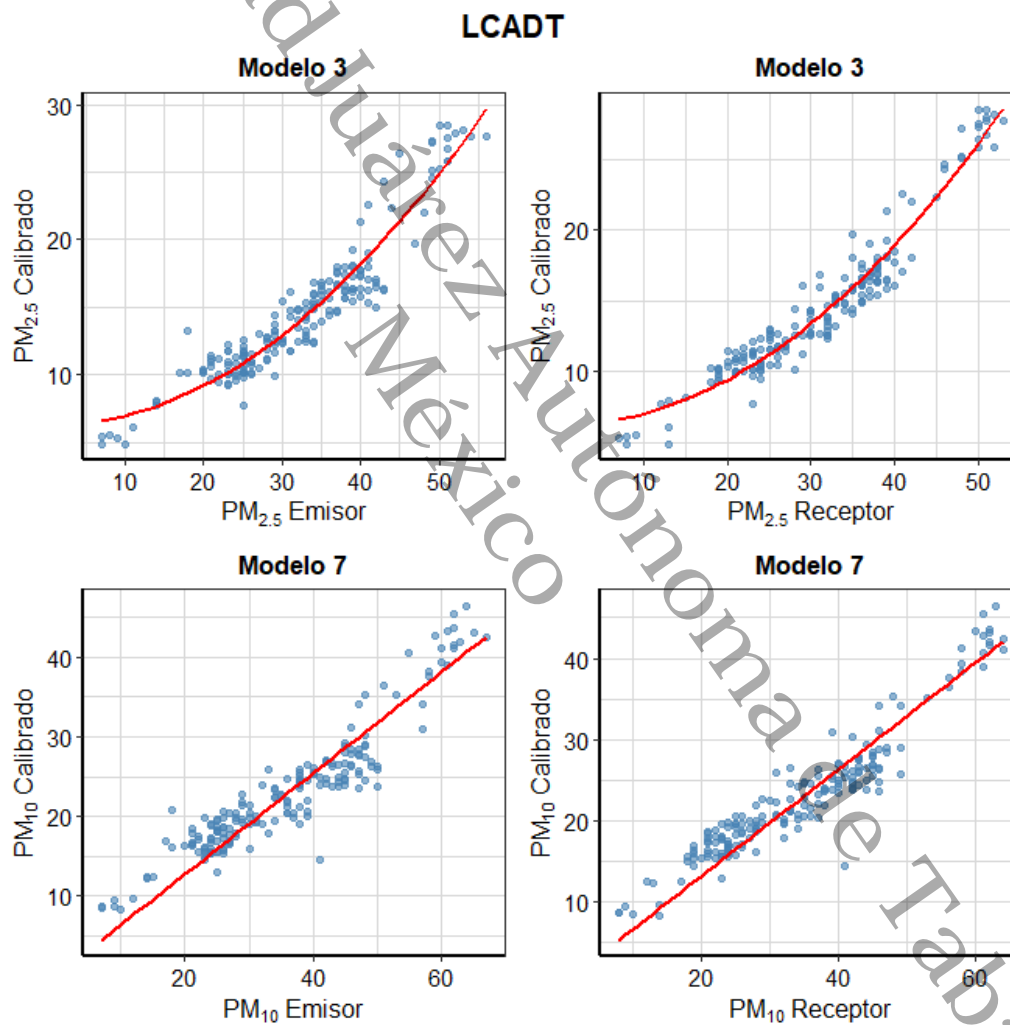
La figura 18 muestra los gráficos de los datos observados y las curvas de calibración seleccionados en la cafetería. Para las $PM_{2.5}$ Los modelos que se ajustaron mejor fueron los modelos lineales, 13 para el emisor y 14 para el receptor con un R^2 bajo de 0.72 para el emisor y 0.70 del receptor, sin embargo, los valores del MAE y RMSE fueron los más bajos. Para las concentraciones de partículas de PM_{10} el modelo que mejor se ajustó para ambos equipos fue el modelo 18, que para el emisor es un modelo cuadrático y para el receptor es un modelo lineal, con un R^2 de 0.71 para el emisor y 0.98 del receptor, en ambos equipos el MAE y RMSE no fueron los más bajos.

La figura 19 presenta los gráficos de las curvas de calibración seleccionadas para el estacionamiento. Para la concentración de partículas $PM_{2.5}$ los modelos que tienen mejores ajustes son los modelos 21 para el emisor con valores de R^2 , MAE y RMSE bajos, mientras que para para el receptor el modelo que mejor se ajusto fue el modelo 25, considerando que el valor de R^2 fue de 0.99, sin embargo, MAE y RMSE fueron los



más altos. La concentración de PM_{10} , para el emisor fue el modelo 27 con un R^2 de 0.89, un MAE de $1.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y RMSE de $2.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo ambos modelos lineales. Para el receptor el modelo 31 fue el de mejor ajuste ya que su R^2 fue de 0.77 aunque con un MAE de $1.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y RMSE de $2.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ considerados los más bajos.

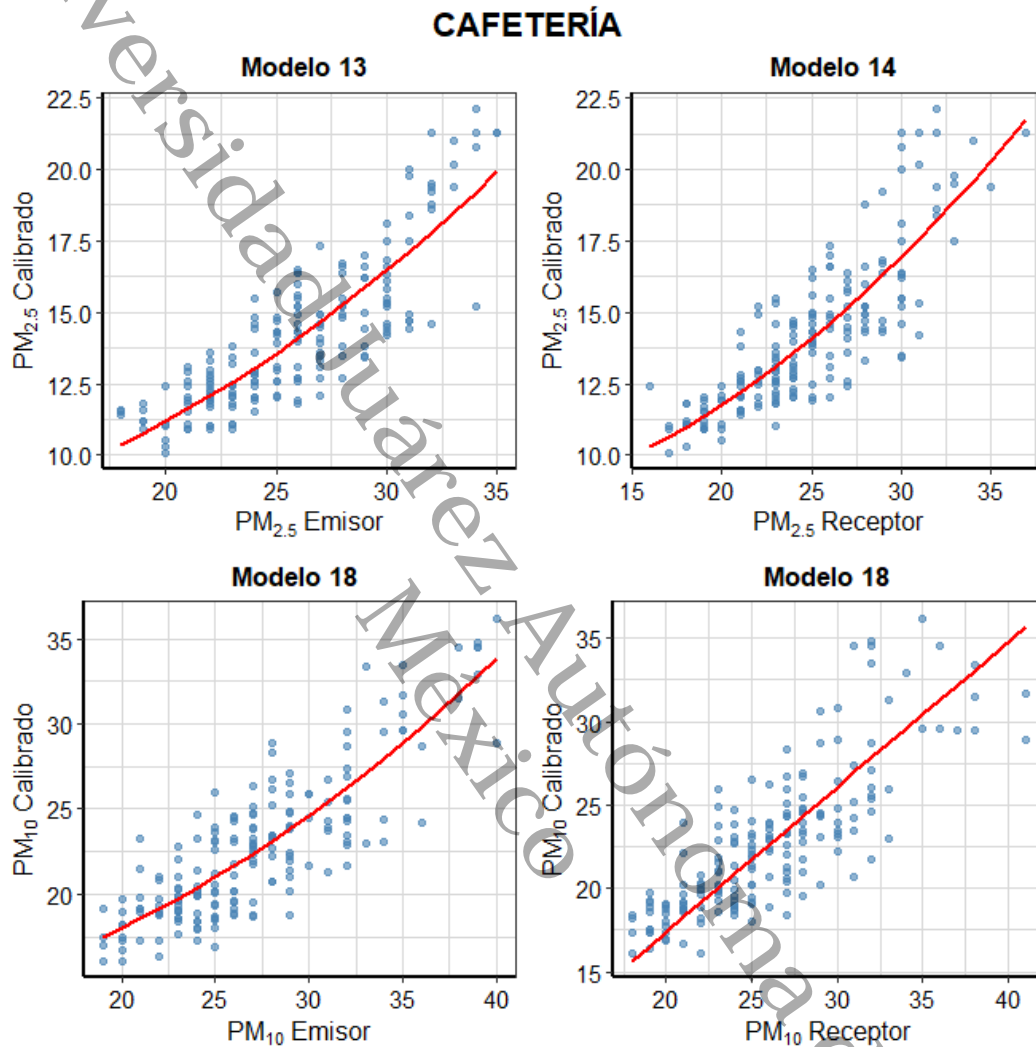
Figura 17. Modelos de calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del emisor y receptor en LCADT



Nota. Modelos seleccionados para cada equipo del sistema correspondientes a las concentraciones $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el LCADT. Elaboración propia en RStudio.



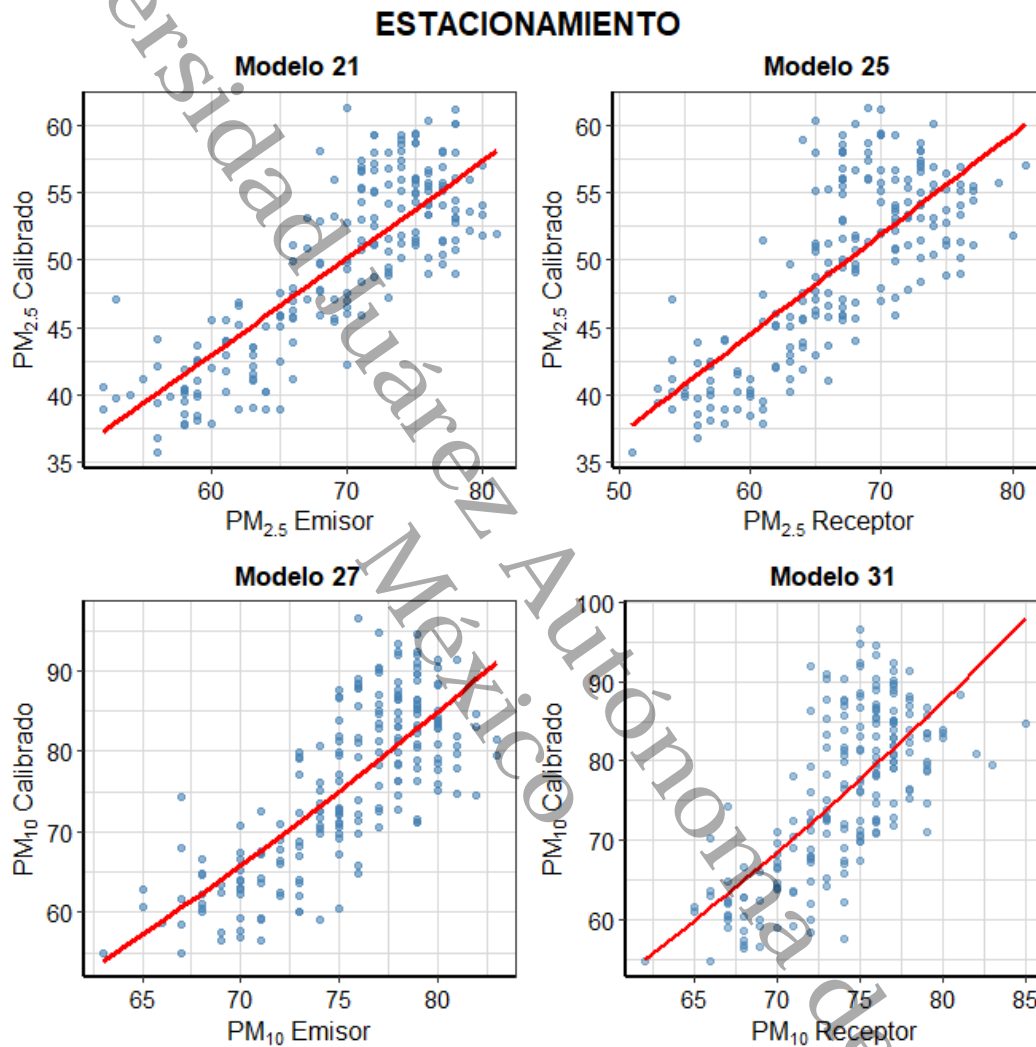
Figura 18. Modelos de calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del emisor y receptor en Cafetería



Nota. Modelos de calibración con mejor ajuste para las concentraciones $PM_{2.5}$ y PM_{10} de cada equipo del sistema en la Cafetería. Elaboración propia en RStudio.



Figura 19. Modelos de calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del emisor y receptor en Estacionamiento



Nota. Los modelos seleccionados para las concentraciones $PM_{2.5}$ y PM_{10} son los que mejor se ajustan para los datos obtenidos del estacionamiento. Elaboración propia en RStudio.



8.4 Estadísticos Generales de las Concentraciones de Partículas

En esta sección se presentan las estadísticas de los datos de monitoreos de calidad del aire obtenidos a partir del 8 septiembre, usando el sistema emisor-receptor ya calibrado. La tabla 9 presenta un resumen estadístico de temperatura, la humedad relativa del aire y la concentración de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ de cada sitio de monitoreo.

Con respecto a las temperaturas registradas en el LCADT el promedio general de la temperatura fue de $27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura máxima fue de $35.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el aire exterior y la temperatura mínima de $21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el aire interior. En la cafetería el promedio general de la temperatura fue de $29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura máxima fue de $32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la mínima de $26.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura promedio en el estacionamiento fue de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, la temperatura máxima fue de $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ por el emisor y la mínima fue de $27.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Con respecto a la humedad relativa en el LCADT se observó gran variabilidad, en el aire exterior (emisor). Su valor mínimo fue de 44.6% y su máximo de 97.6% . La cafetería presentó una humedad relativa con un valor mínimo de 50.2% y su máximo de 65.3% . El estacionamiento fue el sitio donde se presentó la humedad relativa con el valor más alto en comparación del LCADT y cafetería, alcanzando el 100% de humedad, mientras que el valor mínimo fue de 65% , ambos datos registrados por el receptor.

En lo que respecta a la concentración de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , en el LCADT el mínimo fue de $1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el exterior y $2\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el interior, mientras que los valores máximos fueron de $198\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el exterior y $182\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el interior. En la cafetería la concentración de $PM_{2.5}$ fue de hasta $740.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ y la de PM_{10} fue hasta de $1008.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. En el estacionamiento la concentración de $PM_{2.5}$ máxima fue de $47.6\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para PM_{10} fue de $72\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Tabla 9. Resumen de Medidas de Tendencia Estadísticas en LCADT, Cafetería y Estacionamiento

SITIO		Min	Max	Media	Mediana	DE	LI	LS
LCADT	Te	23.1	35	28.4	28.2	2.4	28.38	28.41
	Tr	21.2	32.8	27.2	27.7	1.8	27.18	27.21
	HRe	44.6	97.6	81.7	84.9	8.1	81.64	81.75
	HRr	45.0	94.1	77.3	79.4	9.2	77.23	77.36
	PM2.5e	1	198	35	33	17.7	34.88	35.11
	PM10e	1	198	29.4	37	20.7	29.26	29.53
	PM2.5r	2	177	28.7	25	21.7	28.55	28.84
	PM10r	2	182	20.6	25	23	20.44	20.75
CAFETERÍA	Te	28.6	32.5	30.4	30.4	1.1	30.34	30.46
	Tr	26.6	31.4	29.2	29.6	1.5	29.12	29.28
	HRe	50.2	60.0	56.4	56.5	2.1	56.28	56.52
	HRr	65.0	65.3	56	65	0.1	55.99	56.01
	PM2.5e	13.9	740.6	103.1	120.8	55.7	100.01	106.19
	PM10e	17.0	1008	238.4	238.6	31.8	236.64	240.16
	PM2.5r	13.9	726.2	56.3	56.6	2.1	56.18	56.42
	PM10r	10.0	239.9	65	65	0.1	64.99	65.01
ESTACIONAMIENTO	Te	28.5	32.6	30.4	30.4	1.6	30.01	30.19
	Tr	27.8	32.5	29.6	29.3	1.7	29.31	29.49
	HRe	66.0	89.2	75.2	75.3	6.7	67.13	67.87
	HRr	65.0	100	85.8	87.4	7.1	66.40	67.20
	PM2.5e	26.9	47.6	30.4	30.3	4.2	16.07	16.53
	PM10e	16.0	45.0	26	26.7	17.2	47.54	49.46
	PM2.5r	18.1	46.1	26.6	7.2	7.2	18.30	19.10
	PM10r	25.5	72.0	42.1	44.2	13.7	35.64	37.16

Nota. La tabla resume los valores de mínimo, máximo, media, mediana y desviación estándar de los parámetros ambientales en cada sitio. LI y LS corresponden a los límites inferior y superior del intervalo de confianza del 95% para la media.



La base de datos generada de los muestreos de cada sitio permitió elaborar gráficos de tendencia horaria. En la figura 20 se presentan el comportamiento de la tendencia horaria de la temperatura en cada sitio.

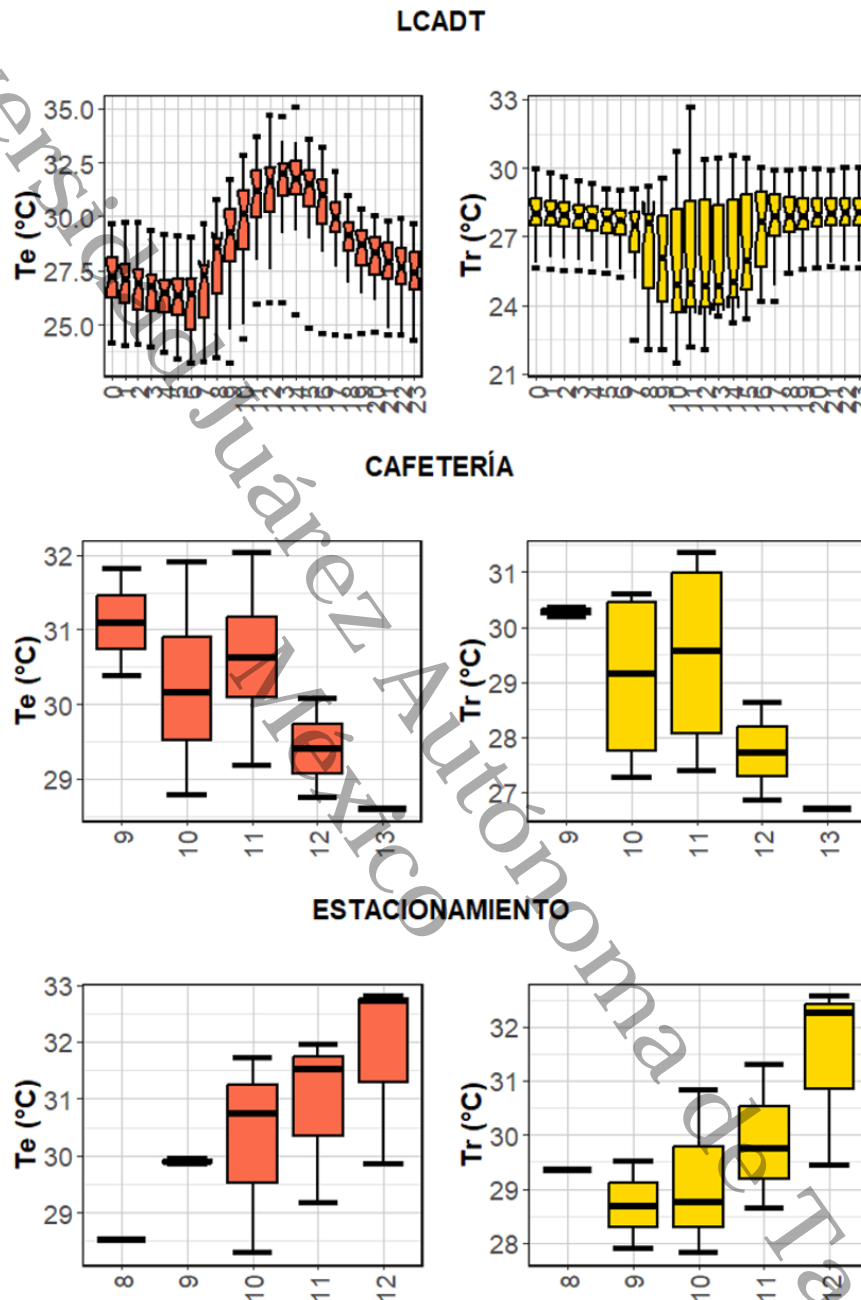
En el gráfico LCADT se observa que la temperatura mínima registrada en el exterior (emisor) se dio a las 05:00 horas y fue de 26 °C y la temperatura máxima a las 13:00 horas y fue de 32 °C. El incremento fue de 6 °C. En el interior (receptor) la temperatura mínima se presentó a las 12:00 y 13:00 horas con 24.5 °C, mientras que el máximo desde las 22:00 horas hasta las 02:00 hora con 28 °C. El incremento de temperatura fue de 3.5 °C.

Por otra parte, en la cafetería el valor mínimo de temperatura se presentó a las 12:00 horas con un valor de 29.4 °C y el máximo alcanzó 31.1 °C a las 09:00 horas de acuerdo con los datos del emisor. El receptor registró un mínimo de 27.7 °C a las 12:00 horas y un máximo de 30.3 °C a las 09:00 horas.

En el gráfico del estacionamiento se aprecia un incremento continuo de temperatura a lo largo de las horas del día. De acuerdo con los datos del emisor la mínima fue de 29.9 °C a las 09:00 horas, mientras que la máxima se alcanzó a las 12:00 horas con 32.8 °C, lo que representó un incremento de 2.9 °C. En cuanto al receptor (Tr) el valor mínimo se registró a las 09:00 horas con 28.7 °C, mientras que el valor máximo lo alcanzó a las 12:00 horas con 32.6 °C, con un incremento total de 3.9 °C.



Figura 20. Tendencia Horaria de Temperatura en; LCADT, Cafetería y Estacionamiento



Nota. La figura muestra gráficos del comportamiento de la temperatura °C en los horarios de muestreo de cada sitio, por el sistema emisor-receptor. Elaboración propia en RStudio.



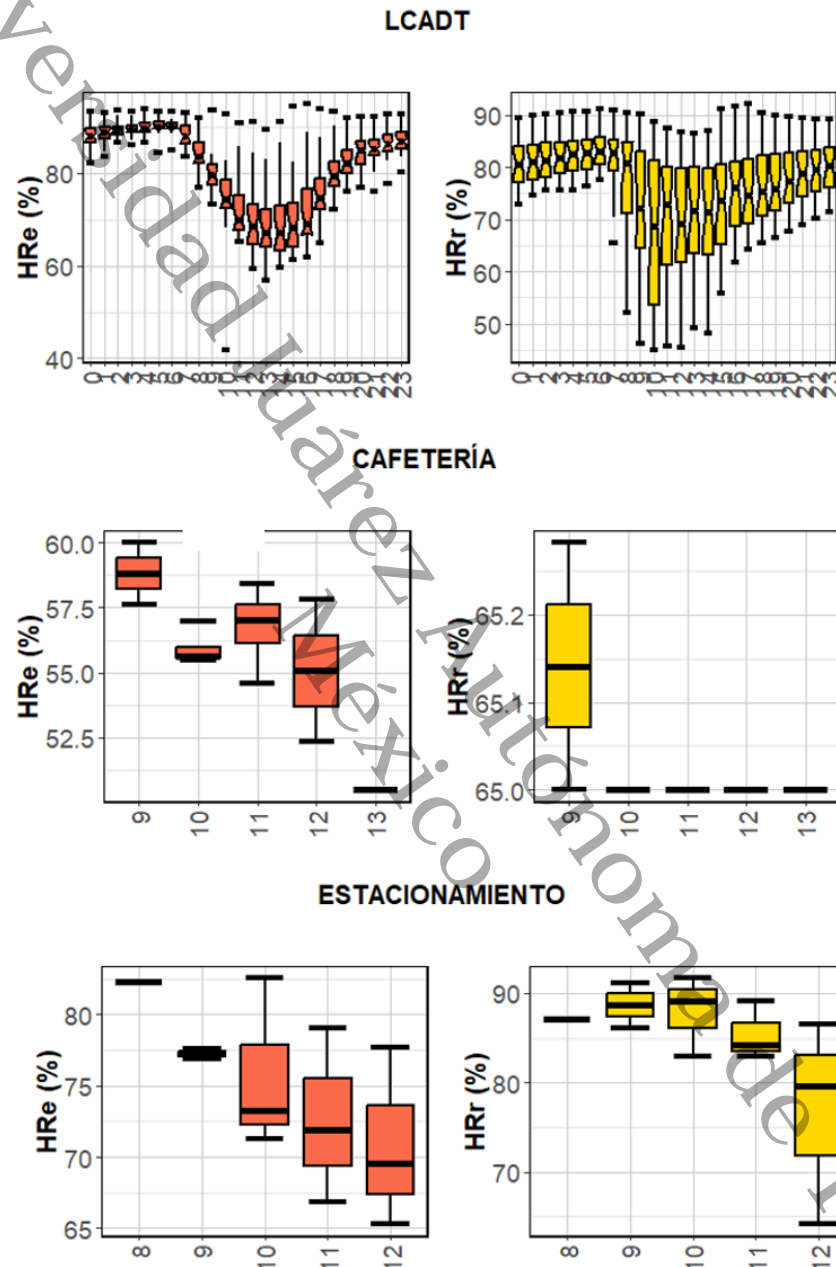
La figura 21 muestra los gráficos de tendencia horaria de la humedad relativa del aire. La tendencia horaria de la humedad relativa en el sitio LCADT, muestra que el exterior (emisor) registro a las 13:00 horas su valor mínimo de humedad en 69% y las 05:00 y 06:00 horas su máximo en 90%. Se observó un descenso notable de la humedad relativa a las 08:00 horas, seguido de un incremento a las 14:00 horas alcanzando aproximadamente 87% a las 23:00 horas. La humedad relativa registrada en el aire interior (receptor) mostró menos variabilidad y a las 10:00 horas se registró su valor mínimo con 68%, mientras que el valor máximo ocurrió a las 06:00 horas con aproximadamente 84%.

En la cafetería, se observó que el emisor (HRe) registro el valor mínimo a las 12:00 horas con una humedad relativa de 55% aproximadamente, y un máximo de 58.7% a las 09:00 horas. De manera similar, el receptor (HRr) registro su valor máximo a las 9 horas con una humedad relativa de 65.1 % y con un mínimo de 65%. Entre las 10 y las 13 horas, la humedad relativa se mantuvo estable con un 65%.

Por otra parte, en el estacionamiento, ambos equipos registran los mayores valores altos de humedad relativa en comparación con los otros sitios. Los datos registrados por el emisor muestran que el valor mínimo se registró a las 12 horas con 69% de humedad relativa y un máximo a las 09:00 horas con un registro de 77%. En contraste, el valor mínimo registrado por el receptor fue de 79% a las 12:00 horas y el valor máximo a las 10:00 horas con un valor cercano a 89%. En conjunto, estas diferencias reflejan la influencia de las condiciones físicas y ambientales de cada sitio.



Figura 21. Tendencia Horaria de Humedad Relativa del Aire en; LCADT, Cafetería y Estacionamiento



Nota. La figura presenta la tendencia horaria de la humedad relativa de los sitios de muestreo. Elaboración propia en RStudio.



En la figura 22 se muestran la tendencia horaria de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, en cada sitio de muestro. Estos gráficos permiten identificar los cambios en los niveles de partículas a lo largo del día y visualizar las diferencias entre el LCADT, la Cafetería y el Estacionamiento.

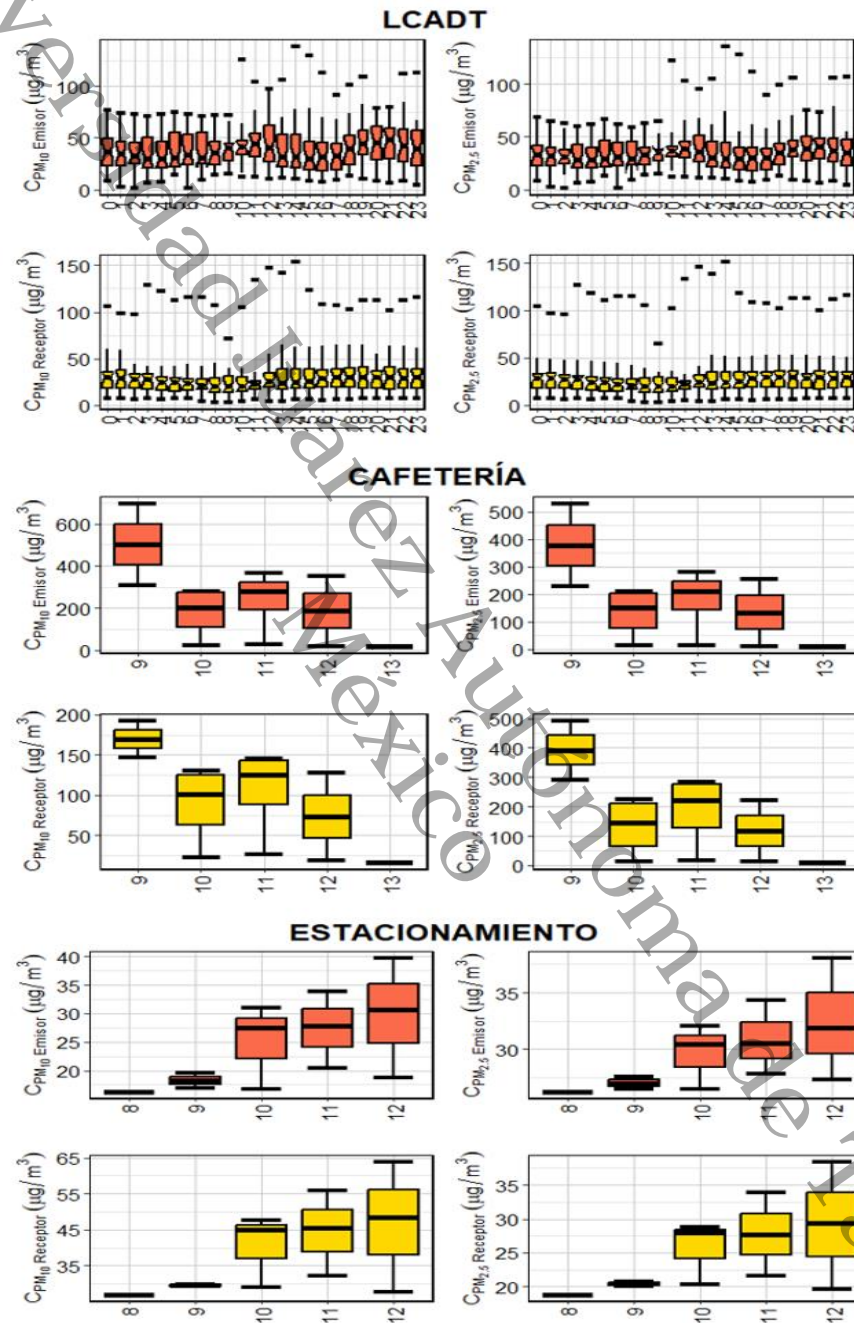
La grafica que de tendencia en LCADT, muestra que las concentraciones de PM_{10} en el exterior (emisor) fueron más variables que las registradas en el interior (receptor). El emisor registro las concentraciones máximas de PM_{10} a las 21:00 horas con $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el mínimo a las 15:00 horas con $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Similar a lo anterior, las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por el emisor son más variables que las del receptor. Los datos registrados por el receptor para las concentraciones de PM_{10} muestran un máximo de concentraciones a partir de las 16:00 horas hasta las 01:00 horas con $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el valor mínimo ocurre desde las 08:00 hasta las 10:00 horas con $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera similar ocurre con el valor mínimo para las concentraciones de $PM_{2.5}$.

En la cafetería la concentración de PM_{10} el valor máximo fue de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $375 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para las $PM_{2.5}$, ambos datos registrados a las 09:00 horas. Mientras que los valores bajos para las concentraciones de PM_{10} fueron de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para $PM_{2.5}$ $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ambos registros a las 10:00 horas.

En el estacionamiento la tendencia de la mediana mostro un incremento en la concentración de partículas conforme va pasando las horas del día. El valor máximo para las concentraciones de PM_{10} medidas por el emisor fue de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:00 horas, con un valor mínimo es a las 09:00 horas de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por el emisor, los valores máximos fueron a las 12:00 horas con $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el valor mínimo a las 09:00 horas tiende a medir $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a los datos registrados por el receptor, las concentraciones de partículas PM_{10} máximas son dadas a las 12:00 horas con $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el mínimo ocurre a las 09:00 horas con $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ registraron un valor máximo a las 12 horas con $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, registrando a las 09:00 de la mañana el valor mínimo de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 22. Tendencia Horaria de las Concentraciones de Partículas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en; LCADT, Cafetería y Estacionamiento



Nota. Elaboración propia en RStudio.

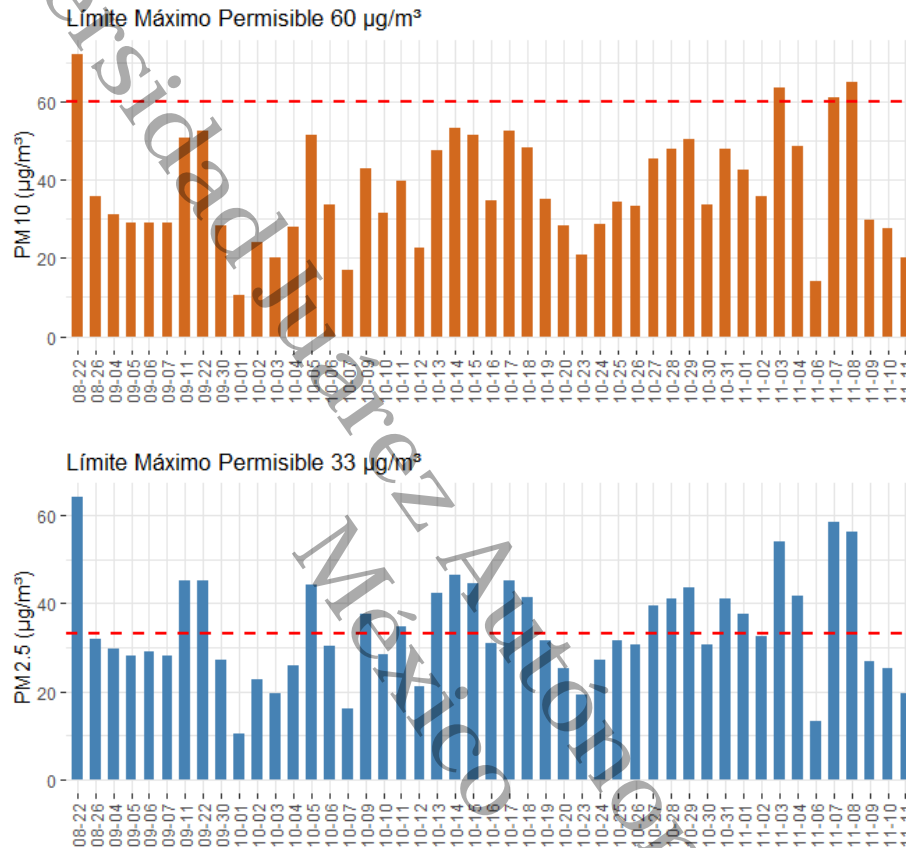


La figura 23 muestra el comportamiento de la concentración promedio de 24 horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidas en el aire exterior del sitio LCADT. La línea recta horizontal a trazos de color rojo en la figura, indica el valor límite de 24 horas puesto en $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ según la NOM-025-SSA1-2021. De los 47 días con valores válidos diarios, en 20 se excedió la norma con respecto a las $PM_{2.5}$, lo que representó un 42.5 % del total de días con registro. Con relación a las PM_{10} , solo 4 días se excedió la norma, lo que representó un 8.5 % del total de días con registro.

Las partículas PM_{10} , excedieron su valor límite el 22 de agosto donde la concentración fue de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los días 3, 7 y 8 de noviembre donde la concentración estuvo entre 60 y $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración mínima se presentó el día 1 de octubre y fue de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del 6 de noviembre con un valor de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Con respecto a las $PM_{2.5}$, el 22 de agosto se presentó el máximo y fue de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y el 1 de octubre el mínimo y fue de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 23. Comportamiento de la concentración promedio de 24 horas de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el sitio LCADT y comparación con el valor límite de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Nota. La figura muestra la variación temporal de las concentraciones PM_{10} y $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el período de estudio. La línea roja discontinua representa el valor normativo, permitiendo identificar episodios de superación de los estándares de calidad del aire. Elaboración propia en RStudio.



9. Discusión

En este trabajo en general se observó que el sensor PMS5003 tendió a sobre estimar la concentración mediana de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} con respecto al equipo de referencia Temtop. Solo en el sitio estacionamiento la concentración mediana de PM_{10} registradas con el sensor PMS5003 quedo por debajo de la registrada por el Temtop. También se observó que la diferencia en concentraciones fue mayor para las partículas $PM_{2.5}$ que para las partículas PM_{10} . Para las primeras fue hasta de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para las segundas fue hasta de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Osorio de la Cruz (2025) encontró resultados similares en su trabajo de tesis. Su monitoreo lo realizó en dos paradas de transporte escolar aledañas a la DACBIOL. En la parada con menor tráfico midió una diferencia de partículas $PM_{2.5}$ de hasta $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de hasta $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} . En ambos casos se concluyó que es importante realizar las calibraciones distinguiendo por sitio de monitoreo.

En los monitoreos llevados a cabo en LCADT, cafetería y estacionamiento, se observó que las condiciones de cada sitio influyen en las variaciones de las concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, temperatura y humedad relativa del aire. En el LCADT el equipo receptor, que está en el interior, midió concentraciones en un rango de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tanto para PM_{10} y $PM_{2.5}$, y $182 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $177 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. Sin embargo, el emisor, que se ubicó en el exterior en todo momento, registro datos en el rango de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tanto para PM_{10} como para $PM_{2.5}$. De acuerdo con los estudios realizados por Matías Velázquez et al., (2015) las altas concentraciones de partículas se deben a las actividades de limpieza, manipulación de materiales y equipo que se realizan en espacios interiores, mientras que, en el exterior, las corrientes de aire dispersan a las partículas. Por eso es de esperarse que, en espacios interiores ocupados como la cafetería, la concentración de partículas sea alta.



La temperatura y la humedad relativa si se relacionaron con la concentración de partículas. Los modelos donde solo se usaron como variables correctoras temperatura y humedad obtuvieron coeficientes de determinación R^2 en el rango de 0.26 a 0.49. Esto significa que estos modelos a lo más solo pudieron explicar el 49 % de la variabilidad observada de la concentración de partículas medidas con el Temtop. Sin embargo, los modelos en donde se utilizó solo la concentración medida de partículas por el sensor PMS5003 obtuvieron valores de R^2 en su mayoría superiores a 0.90. Esto es un indicativo de la utilidad de las mediciones con el sensor PMS5003. Un resultado similar encontró Osorio de la Cruz (2025) en su trabajo de tesis. Sus modelos de regresión donde solo incluyó temperatura y humedad como variables para estimar concentraciones comparables con las medidas por el equipo de referencia obtuvieron R^2 en el rango de 0.24 a 0.46. En algunos trabajos de monitoreo de partículas, los autores han indicado que Las condiciones ambientales y factores meteorológicos influyen en la dinámica de las concentraciones y distribución de las partículas suspendidas en el aire. También que los cambios de clima de cálidos a secos incrementan la concentración en el aire. Por otra parte, si la humedad es muy alta las partículas tienden a desaparecer minimizando su presencia en la atmosfera (Tene & Fernández, 2025). Por tal motivo a futuro se realizarán monitoreos en diferentes épocas del año para estudiar el efecto de la humedad y temperatura en condiciones locales sobre las mediciones de concentración del sensor PMS5003.

El sitio de monitoreo LCADT fue donde finalmente se dejó de manera permanente el equipo emisor y su receptor. Esto permitió el monitoreo 24 horas continuas e hizo posible evaluar el cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2021 que establece los valores límites para la concentración de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} en un promedio de 24 horas de 60 y 33 $\mu g/m^3$ respectivamente. De los 47 días de monitoreo en el periodo del 22 de agosto al 11 de noviembre, las $PM_{2.5}$ incumplieron la norma solo 4 días (un 8.5 %) y las PM_{10} incumplieron la norma 20 días (42.5 %). Verificar el cumplimiento de las normas ha sido el objetivo del desarrollo de equipos que miden partículas. Por ejemplo, en un estudio realizado en Pomplona, Colombia por Bonilla-



Granados et al. (2023) se comparó la concentración de partículas $PM_{2.5}$ en cuatro sitios de monitoreo utilizando sensores de bajo costo entre julio y septiembre de 2022. La Resolución Colombiana 2254 en 2017 establece el límite máximo permisible de 24 horas de exposición a las $PM_{2.5}$ en $37 \mu g/m^3$. El estudio mostro resultados favorables ya que el valor máximo medido fue de $15 \mu g/m^3$ y no excedió el límite máximo permisible. Poder evaluar el cumplimiento de la NOM-025 es un incentivo para continuar con el monitoreo 24 h por 365 día del año y este ha sido el objetivo de desarrollar equipos con el PMS5003. Para monitoreos de larga duración es posible que se tenga que modificar el sistema de recepción de datos ya que en esta investigación se observó que el módulo bluetooth del receptor tendió a desconfigurarse por corte repentino de energía principalmente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México



10. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El desarrollo de los equipos del sistema de monitoreo con SBC fue una opción económicamente viable en este trabajo de bajo recurso. Las cajas plásticas y los tripiés que dieron soporte a los componentes del sistema facilitaron su transporte a los tres sitios de monitoreo.

Los datos de monitoreo que se midieron en la etapa de calibración del sistema emisor-receptor demuestra que los sensores del sistema tendieron a medir valores, en general, por encima del equipo de referencia Temtop en el LCADT y Cafetería, mientras que para los registros de concentración de partículas de PM_{10} en el Estacionamiento, el sistema emisor-receptor midió valores más bajos que los del Temtop.

Las curvas de calibración que ajustaron mejor a las concentraciones de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidas con el equipo de referencia obtuvieron coeficientes de determinación R^2 que van de 0.71 a 0.99. El modelo para la concentración PM_{10} en el LCADT fue un modelo lineal que tuvo un R^2 de 0.98 tanto para el emisor como para el receptor. El modelo que mejor se ajustó a las concentraciones de $PM_{2.5}$ fue un modelo con un R^2 de 0.90 para el emisor y 0.99 del receptor. Para la Cafetería la curva de calibración que mejor se ajustó a las concentraciones de PM_{10} fue un modelo de línea recta sin ordenada al origen con un R^2 de 0.98, sin embargo, el MAE y RMSE fueron los más altos. Para las $PM_{2.5}$ el mejor modelo fue uno de línea recta también, pero con ordenada al origen, Su R^2 fue de 0.72 y su MAE y RMSE fueron los más bajos. Para el estacionamiento el modelo que mejor se ajustó a las concentraciones de PM_{10} fue un modelo cuadrático con un R^2 de 0.89. El receptor tuvo mejor desempeño en las mediciones de las concentraciones de $PM_{2.5}$ ajustándose a un modelo de línea recta con un R^2 de 0.99 y un MAE de $1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y RMSE $1.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Con respecto a la tendencia horaria, los registros de temperaturas en el exterior del LCADT muestran que los valores más bajos se presentaron en la madrugada a las 5:00 horas con 26 °C. La temperatura aumento en el horario de las 13:00 horas con 32 °C. En la cafetería la temperatura tuvo su valor mínimo a las 12:00 horas de 27.7 °C por el receptor y un máximo de 31.1 °C a las 09:00 horas por el emisor. En estacionamiento el mínimo medido fue 28.7 °C a las 9:00 horas por el receptor y el máximo fue de 32.8 °C a las 12 horas por el emisor.

De acuerdo con la tendencia horaria la humedad relativa fue mayor en el estacionamiento llegando a registrar máximo de 100%. La mayor variabilidad observada en esta variable fue en el exterior del sitio LCADT con valores que fueron de 44.6% a 97.6%

Los límites Máximos Permisibles establecidos por la NOM-025-SSA1-2021 para las concentraciones de partículas PM_{10} , con un límite máximo permisible de 60 $\mu g/m^3$, se excedieron el 8 de agosto, 3, 7 y 8 de noviembre llegando a medir concentraciones de hasta 70 $\mu g/m^3$. Los días con la mínima concentración de partículas PM_{10} se presentaron el día 1 de septiembre con un mínimo de 10 $\mu g/m^3$, seguido del 6 de noviembre con un valor de 15 $\mu g/m^3$. El límite máximo permitido para la $PM_{2.5}$ es de 33 $\mu g/m^3$. Los resultados en el exterior del sitio LCADT mostraron 21 días que excedieron este límite. En particular, el 22 de agosto registró un máximo de 72 $\mu g/m^3$, y el 1 de octubre un mínimo de 10 $\mu g/m^3$.



Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos y el funcionamiento del sistema emisor-receptor, se hacen las siguientes recomendaciones.

- Los Módulos HC-05 de comunicación bluetooth, se recomiendan únicamente para proyectos temporales o académicos, ya que necesitan configurarse con frecuencia por que pierden la señal principalmente cuando hay cortes de energía eléctrica.
- Aunque la temperatura y humedad relativa muestran cierta relación con las concentraciones de partículas, los modelos de calibración que emplearon estas variables presentaron un valor de R^2 bajo. Aun así, debe estudiarse su importancia en este tipo de modelos en diferentes periodos del año.
- Se recomienda calibrar los sensores PMS5003 utilizando equipos de referencia que cuenten con sistema de registro de datos. Esto permitiría el monitoreo continuo en periodos más extensos, de varios días por ejemplo y así obtener curvas de calibración validadas para un mayor rango de temperatura, humedad y concentración de partículas.



11. Glosario

11.1 Radiofrecuencia:

Tecnología de comunicación inalámbrica que usa ondas electromagnéticas través del aire o el vacío para transmitir información.

11.2 Calibración:

Proceso mediante el cual se verifica y ajusta la precisión de valores obtenidos por un equipo de referencia.

11.3 HC-05:

Es un módulo Bluetooth que se comunica mediante protocolo UART. Permite la conexión inalámbrica entre dispositivos para transmitir datos de forma sencilla y eficiente.

11.4 Condiciones locales:

Factores propios de un lugar como la temperatura, humedad relativa y concentraciones de partículas.

11.5 Termistor:

Es una resistencia que varía su valor significativamente con los cambios de temperatura.



12. Referencias Citadas

- Aosong Electronics. (s. f.). *DHT22 (AM2302) digital temperature and humidity sensor datasheet*. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/DHT22.pdf>
- Arduino. (s. f.). *Arduino Mega 2560 Rev3*. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Arduino.cl. (2025, 2 de julio). *Arduino Mega 2560 R3*. <https://arduino.cl/producto/arduino-mega-2560/>
- AV Electronics. (2025, 3 de julio). *DHT11 temperatura y humedad*. <https://avelectronics.cc/producto/dht11-temperatura-y-humedad/>
- Ávila Paz, J. (2017). *Sistema confortable para la movilización de personas discapacitadas [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Ciénega]*. <https://riudg.udg.mx/bitstream/20.500.12104/71600/1/LCUCIENEGA00490FT.pdf>
- Bañuelos Saucedo, M. Á., Villegas Salas, R. G., & Pacheco Castañeda, M. (2022). *Manual de programación con Arduino (Proyecto PAPIME PE101620)*. UNAM. <https://iaciduino.enp.unam.mx/wpArduino/index.php/manual-de-programacion-con-arduino/>
- Barrios Suter, O. R. (2021). *Evaluación operacional del desempeño de un sensor de bajo costo para monitoreo de material particulado atmosférico en diferentes condiciones ambientales [Tesis de maestría, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias]*. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/183876/Evaluacion-operacional-del-desempe%C3%B1o-de-un-sensor.pdf>
- Bonilla-Granados, C. A., Sánchez-Delgado, A. Y., Rubio-Gómez, Y. M., & Cortez-Huerta, M. (2023). *Niveles de concentración por PM2.5 mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia*. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3), 29–38. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023003>
- CAI. (2023, 13 de septiembre). *La importancia de tener sensores de calidad del aire en espacios cerrados*. <https://www.suez.com/es/aire-espana/noticias/importancia-de-tener-sensores-de-calidad-del-aire-espacios-cerrados>



Calderón Ruiz, M. E. (2019). *Implementación de un prototipo de gafas y bastón electrónico creando una red inalámbrica de comunicación y alerta para personas con discapacidad visual [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]*.

<https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/002d4a97-2356-48c0-8fac-fa4afb798feb/content>

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). *Normas oficiales mexicanas (NOM) de calidad del aire ambiente*.
<https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>

Conner, C., Clements, A., & Williams, R. (2017). *Cómo evaluar sensores de bajo costo mediante la colocación con monitores del método de referencia federal*. U.S. Environmental Protection Agency.
https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102121-tagged-guide-02p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-collocation-instruction-guide-10-13-2021_508-tagged-1.pdf

Del Valle Hernández, L. (2020, 18 de mayo). *Sensor de temperatura: escoge el mejor para tus proyectos con Arduino*. Programarfacil.
<https://programarfacil.com/podcast/82-escoger-mejor-sensor-temperatura-arduino/>

Del Valle Hernández, L. (2021, 23 de marzo). *Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino*. Programarfacil.
<https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>

Diario Oficial de la Federación. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación*.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5633855



- DKV Seguros. (2025, 11 de junio). *La contaminación atmosférica: qué es y cómo nos afecta*. <https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/causas-de-la-contaminacion-atmosferica>
- Fernández, E. (2021, 16 de septiembre). *Contaminantes criterio: una amenaza creciente para la salud humana*. TSI Group. <https://tecnosolucionescr.net/blog/528-contaminantes-criterio-una-amenaza-creciente-para-la-salud-humana>
- Fernández, Y. (2024, 14 de noviembre). *Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno*. Xataka. <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>
- Geek Factory. (2025, 30 de mayo). *PMS5003 sensor de calidad de aire PM2.5*. <https://www.geekfactory.mx/producto/pms5003-sensor-de-calidad-de-aire-pm2-5/>
- González, A. G. (2023, 10 de enero). *Arduino Mega: características y capacidades*. Panama Hitek. <https://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>
- Gudino, M. (2022, 13 de octubre). *Arduino Uno vs. Mega vs. Micro*. Arrow. <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articulos/arduino-uno-vs-mega-vs-micro>
- Hengko. (2022). *How does temperature and humidity sensor work – 02?* <https://www.hengko.com/es/news/how-does-temperature-and-humidity-sensor-work-02/>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (2024, 9 de abril). *Material particulado*. <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado/>
- Intecx. (2025, 27 de junio). *Sensor PMS5003 de concentración de partículas alta precisión PM2.5*. <https://intecx.com.pe/product/sensor-pms5003/>
- Kunak Technologies S.L. (2025, 15 de mayo). *Partículas en suspensión: sensor de PM2,5*. <https://kunakair.com/es/cartuchos-inteligentes/particulas-en-suspension/>
- Llamas, L. (2015, 15 de julio). *Medir temperatura con Arduino y sensor LM35*. <https://www.luisllamas.es/medir-temperatura-con-arduino-y-sensor-lm35/>
- Marmolejo, H. U. R. (2007). *Desarrollo de monitor de humedad relativa y temperatura*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67403805>



- Matías Velázquez, A. A., & Torrez Cortés, P. de J. (2015). *Modelo para la estimación de la exposición a la contaminación del aire interior en edificios de la División Académica de Ciencias Biológicas* [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].
- Mkt, S. (2023, 6 de julio). *Importancia del sensor de aire en la medición de su calidad y contaminantes existentes*. SensorGO. <https://sensorgo.mx/sensor-de-aire-y-medicion-de-calidad/>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). *Introducción al análisis de regresión lineal*. CECSA.
- Montoya, S. (2017, 14 de mayo). *Tutorial de instalación y puesta en marcha de un sensor de polvo en Arduino*. Gidahatari. <https://gidahatari.com/ih-es/tutorial-del-instalacion-y-puesta-en-marcha-de-un-sensor-de-polvo-en-arduino>
- Muñoz, R. (2018). *Qué es Arduino y por qué es tan interesante para aprender a programar*. Computer Hoy. <https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/que-es-arduino-que-es-tan-interesante-aprender-programar-311393>
- Navarrete, G. G., & Soto, K. G. R. (2020). Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire. *Epistemus*, 13(27), 30–37. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v13i27.108>
- Ninahumán, J. U., Alvarez-Tolentino, D. M., Rojas, A. P., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research*, 24(3), 199–207. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.468>
- Nova Fitness. (s. f.). SDS011 laser PM2.5 dust sensor. <https://images.app.goo.gl/rq4TGUZuG1xHUaTX6>
- NovatronicEc. (s. f.). Sensor de polvo / Smoke PM2.5 GP2Y1010AU0F. <https://novatronicec.com/index.php/product/sensor-de-polvo-smoke-pm2-5-gp2y1010f/>
- Osorio de la Cruz, C. M. (2025). *Análisis de concentraciones de PM2.5 y PM10 en paradas de transporte usando sensores de bajo costo* [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].



- Partes del sensor LM35. (s. f.). Google Imágenes. <https://images.app.goo.gl/cLMeomFLic41mK5WA>
- Peñaloza Acosta, M., Arévalo Cohén, F., & Daza Suárez, R. (2009). Impacto de la gestión tecnológica en el medio ambiente. *Revista de Ciencias Sociales*, 15(2), 306–316. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-95182009000200010
- Prana Air. (2022, 29 de diciembre). *¿Qué es el material particulado (PM)?* <https://www.pranair.com/es/what-is-particulate-matter-pm/>
- Prometec. (2023). *Detector de partículas SDS011*. <https://www.prometec.net/detector-de-particulas-sds011/>
- Rsuagued. (2020, 24 de abril). *Arduino*. Blog de Tecnologías. <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/rsuagued/arduino/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Fuentes de contaminación atmosférica*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024, 29 de agosto). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM)*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>
- Sensores DHT11 con PCB y sin PCB. (s. f.). Google Imágenes. <https://images.app.goo.gl/unweHk3jkhJ6GEVG8>
- TecScience. (2025, 2 de junio). *Sensores ambientales inteligentes: qué son*. <https://tecscience.tec.mx/es/divulgacion-ciencia/sensores-inteligentes-ambientales/>
- Tene, R. C. C., & Fernández, E. P. (2025). Análisis del impacto ambiental del material particulado PM10 y PM2.5 en zonas urbanas e industriales: Propuesta de tecnologías para su monitoreo y control. *Código Científico Revista de Investigación*, 6(E1), 576–595. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/ne1/703>
- Tutoriales, C. (2024, 4 de noviembre). *Detector de partículas de polvo con sensor GP2Y1010AU0F*. RogerBit. <https://rogerbit.com/wprb/2024/11/detector-de-polvo>



- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, 24 de junio). *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*. <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025, 7 de abril). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- UNIT Electronics. (2025a, julio). *PMS5003 sensor de calidad de aire PM2.5 - UNIT Electronics*. <https://uelectronics.com/producto/pms5003-sensor-de-calidad-de-aire-pm2-5/#:~:text=INFORMACI%C3%93N,laboratorios%2C%20hospitales%20incluso%20en%20hogares>
- UNIT Electronics. (2025b, julio). *Sensor Nova PM SDS011 láser calidad de aire*. <https://uelectronics.com/producto/sensor-nova-pm-sds011-laser-calidad-de-aire>
- UNIT Electronics. (2025c, 30 de junio). *Sensor de temperatura DHT22 AM2302 - UNIT Electronics*. <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-temperatura-dht22-am2302/?srsltid=AfmBOord4pSI5p-sgEWvwIxFJqEnC10CGit1gYTA6D5y0ItUNJI6TKA>
- UNIT Electronics. (2025d, julio). *LM35 sensor de temperatura - UNIT Electronics*. <https://uelectronics.com/producto/lm35-sensor-de-temperatura/?srsltid=AfmBOoo744TlkaKJGU0y-C4Lf5EJfK4sSPWZ0wTLNiiWGDOPYZm4QJKAp>
- Yañez, C. (2025, 19 de febrero). *Qué es IDE de Arduino y qué se puede hacer con él*. CEAC. <https://www.ceac.es/blog/que-es-el-ide-de-arduino-en-robotica>
- Tzintzun Cervantes, M. G., Rojas Bracho, L., & Fernández Bremauntz, A. (2005). *Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas*. *Gaceta Ecológica*, (74), 15–28. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907402>

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis:	Desarrollo De Un Sistema Emisor-Receptor De Bajo Costo Para Monitoreo De La Calidad Del Aire
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	Sandra de la Cruz López
ORCID:	https://orcid.org/0009-0006-2612-5380
Resumen de la Tesis:	<p>Este trabajo tuvo como objetivo principal desarrollar y calibrar un sistema electrónico emisor-receptor de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire, capaz de medir la concentración de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, así como temperatura y humedad relativa, en tres sitios representativos dentro de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiología): el Laboratorio de Calidad del Aire y Desarrollo Tecnológico (LCADT), la cafetería y el estacionamiento. Para ello se diseñó un sistema de monitoreo ambiental basado en sensores de bajo costo integrados a una tarjeta Arduino Mega, con comunicación inalámbrica vía Bluetooth. También se utilizó un equipo portátil Temtop como monitor de referencia para la calibración principalmente del sensor de partículas PMS5003. Durante el periodo de calibración se observó que el sistema emisor-receptor registró concentraciones mayores que el equipo de referencia en la mayoría de los sitios, especialmente en las mediciones de PM_{2.5}. En el LCADT, las concentraciones medianas de PM_{2.5} medidas por el sistema fueron de hasta 33 µg/m³, mientras que el Temtop registró 14.1 µg/m³. Para PM₁₀, el sistema midió hasta 36 µg/m³ frente a 21.8 µg/m³ del Temtop. En la</p>

cafetería, las $PM_{2.5}$ alcanzaron valores de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el sistema y $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el Temtop, mientras que las PM_{10} fueron de $25\text{--}26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el sistema y $22.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo de referencia. En el estacionamiento, las $PM_{2.5}$ alcanzaron hasta $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el sistema y $50.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el Temtop, mientras que las PM_{10} registraron valores de $75\text{--}76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el sistema y $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el equipo de referencia. La temperatura y humedad relativa también presentaron variaciones según el sitio de monitoreo, mostrando tendencias horarias asociadas a la actividad humana y al flujo vehicular. A partir de estos datos, se aplicaron modelos de regresión lineal que permitieron corregir las desviaciones del sensor y mejorar significativamente la precisión de las mediciones.

Con base en los criterios establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, se identificó que los Límites Máximos Permisibles para PM_{10} ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio de 24 horas) se excedieron los días 8 de agosto, 3, 7 y 8 de noviembre, alcanzando concentraciones de hasta $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los valores mínimos de PM_{10} se registraron el 1 de septiembre con $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 6 de noviembre con $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para las $PM_{2.5}$, cuyo límite máximo permisible es de $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los resultados en el exterior del LCADT mostraron 21 días en los que se superó este valor. En particular, el 22 de agosto se registró una concentración máxima de $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el 1 de octubre presentó el valor mínimo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La tendencia observada fue que las concentraciones de partículas fueron mayores en el estacionamiento y la cafetería en comparación con el LCADT, asociándose principalmente al flujo vehicular y a las actividades humanas en estos espacios. El monitoreo se realizó en periodos específicos del día, en horarios de mayor actividad dentro de la DACBiol.

<p>Palabras claves de la Tesis:</p>	<p>Radiofrecuencia, calibración, termistor, HC-05.</p>
<p>Referencias citadas:</p>	<p>Aosong Electronics. (s. f.). <i>DHT22 (AM2302) digital temperature and humidity sensor datasheet.</i> https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/DHT22.pdf</p> <p>Arduino. (s. f.). <i>Arduino Mega 2560 Rev3.</i> https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3</p> <p>Arduino.cl. (2025, 2 de julio). <i>Arduino Mega 2560 R3.</i> https://arduino.cl/producto/arduino-mega-2560/</p> <p>AV Electronics. (2025, 3 de julio). <i>DHT11 temperatura y humedad.</i> https://avelectronics.cc/producto/dht11-temperatura-y-humedad/</p> <p>Ávila Paz, J. (2017). <i>Sistema confortable para la movilización de personas discapacitadas [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Ciénega].</i> https://riudg.udg.mx/bitstream/20.500.12104/71600/1/LCUCIENEGA00490FT.pdf</p> <p>Bañuelos Saucedo, M. Á., Villegas Salas, R. G., & Pacheco Castañeda, M. (2022). <i>Manual de programación con Arduino (Proyecto PAPIME PE101620).</i> UNAM. https://iaciduino.enp.unam.mx/wpArduino/index.php/manual-de-programacion-con-arduino/</p> <p>Barrios Suter, O. R. (2021). <i>Evaluación operacional del desempeño de un sensor de bajo costo para monitoreo de material particulado atmosférico en diferentes condiciones ambientales [Tesis de maestría, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias].</i> https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/183876/Evaluacion-operacional-del-desempe%C3%B1o-de-un-sensor.pdf</p>

Universidad Tecnológica de las Américas

Bonilla-Granados, C. A., Sánchez-Delgado, A. Y., Rubio-Gómez, Y. M., & Cortez-Huerta, M. (2023). *Niveles de concentración por PM2.5 mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia. Revista UIS Ingenierías, 22(3), 29–38.* <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023003>

CAI. (2023, 13 de septiembre). La importancia de tener sensores de calidad del aire en espacios cerrados. <https://www.suez.com/es/aire-espana/noticias/importancia-de-tener-sensores-de-calidad-del-aire-espacios-cerrados>

Calderón Ruiz, M. E. (2019). *Implementación de un prototipo de gafas y bastón electrónico creando una red inalámbrica de comunicación y alerta para personas con discapacidad visual [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].* <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/02d4a97-2356-48c0-8fac-fa4afb798feb/content>

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). *Normas oficiales mexicanas (NOM) de calidad del aire ambiente.* <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>

Conner, C., Clements, A., & Williams, R. (2017). *Cómo evaluar sensores de bajo costo mediante la colocación con monitores del método de referencia federal.* U.S. Environmental Protection Agency. https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102121-tagged-guide-02p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-collocation-instruction-guide-10-13-2021_508-tagged-1.pdf

Del Valle Hernández, L. (2020, 18 de mayo). *Sensor de temperatura: escoge el mejor para tus proyectos con Arduino.* Programafacil.

	<p>https://programarfacil.com/podcast/82-escoger-mejor-sensor-temperatura-arduino/</p> <p>Del Valle Hernández, L. (2021, 23 de marzo). <i>Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino</i>. Programarfacil. https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/</p> <p>Diario Oficial de la Federación. (2021). <i>Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación</i>. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5633855</p> <p>DKV Seguros. (2025, 11 de junio). <i>La contaminación atmosférica: qué es y cómo nos afecta</i>. https://dkv.es/corporativo/blog-360/medioambiente/contaminacion/causas-de-la-contaminacion-atmosferica</p> <p>Fernández, E. (2021, 16 de septiembre). <i>Contaminantes criterio: una amenaza creciente para la salud humana</i>. TSI Group. https://tecnosolucionescr.net/blog/528-contaminantes-criterio-una-amenaza-creciente-para-la-salud-humana</p> <p>Fernández, Y. (2024, 14 de noviembre). <i>Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno</i>. Xataka. https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno</p> <p>Geek Factory. (2025, 30 de mayo). <i>PMS5003 sensor de calidad de aire PM2.5</i>. https://www.geekfactory.mx/producto/pms5003-sensor-de-calidad-de-aire-pm2-5/</p> <p>González, A. G. (2023, 10 de enero). <i>Arduino Mega: características y capacidades</i>. Panama Hitek. https://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/</p>
--	--

	<p>Gudino, M. (2022, 13 de octubre). <i>Arduino Uno vs. Mega vs. Micro</i>. Arrow. https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/arduino-uno-vs-mega-vs-micro</p> <p>Hengko. (2022). <i>How does temperature and humidity sensor work – 02?</i> https://www.hengko.com/es/news/how-does-temperature-and-humidity-sensor-work-02/</p> <p>Instituto para la Salud Geoambiental. (2024, 9 de abril). <i>Material particulado</i>. https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado/</p> <p>Intecx. (2025, 27 de junio). <i>Sensor PMS5003 de concentración de partículas alta precisión PM2.5</i>. https://intecx.com.pe/product/sensor-pms5003/</p> <p>Kunak Technologies S.L. (2025, 15 de mayo). <i>Partículas en suspensión: sensor de PM2,5</i>. https://kunakair.com/es/cartuchos-inteligentes/particulas-en-suspension/</p> <p>Llamas, L. (2015, 15 de julio). <i>Medir temperatura con Arduino y sensor LM35</i>. https://www.luisllamas.es/medir-temperatura-con-arduino-y-sensor-lm35/</p> <p>Marmolejo, H. U. R. (2007). <i>Desarrollo de monitor de humedad relativa y temperatura</i>. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67403805</p> <p>Matías Velázquez, A. A., & Torrez Cortés, P. de J. (2015). <i>Modelo para la estimación de la exposición a la contaminación del aire interior en edificios de la División Académica de Ciencias Biológicas</i> [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].</p> <p>Mkt, S. (2023, 6 de julio). <i>Importancia del sensor de aire en la medición de su calidad y contaminantes existentes</i>. SensorGO. https://sensorgo.mx/sensor-de-aire-y-medicion-de-calidad/</p>
--	---

	<p>Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2006). <i>Introducción al análisis de regresión lineal</i>. CECSA.</p> <p>Montoya, S. (2017, 14 de mayo). <i>Tutorial de instalación y puesta en marcha de un sensor de polvo en Arduino</i>. Gidahatari. https://gidahatari.com/ih-es/tutorial-del-instalacion-y-puesta-en-marcha-de-un-sensor-de-polvo-en-arduino</p> <p>Muñoz, R. (2018). <i>Qué es Arduino y por qué es tan interesante para aprender a programar</i>. Computer Hoy. https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/que-es-arduino-que-es-tan-interesante-aprender-programar-311393</p> <p>Navarrete, G. G., & Soto, K. G. R. (2020). Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire. <i>Epistemos</i>, 13(27), 30–37. https://doi.org/10.36790/epistemos.v13i27.108</p> <p>Ninahuamán, J. U., Alvarez-Tolentino, D. M., Rojas, A. P., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM2.5) de una ciudad altoandina. <i>Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research</i>, 24(3), 199–207. https://doi.org/10.18271/ria.2022.468</p> <p>Nova Fitness. (s. f.). <i>SDS011 laser PM2.5 dust sensor</i>. https://images.app.goo.gl/rq4TGUZuG1xHUaTX6</p> <p>NovatronicEc. (s. f.). <i>Sensor de polvo / Smoke PM2.5 GP2Y1010AU0F</i>. https://novatronicec.com/index.php/product/sensor-de-polvo-smoke-pm2-5-gp2y1010f/</p> <p>Osorio de la Cruz, C. M. (2025). <i>Análisis de concentraciones de PM2.5 y PM10 en paradas de transporte usando sensores de bajo costo</i> [Tesis de licenciatura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco].</p> <p>Partes del sensor LM35. (s. f.). <i>Google Imágenes</i>. https://images.app.goo.gl/cLMeomFLic41mK5WA</p>
--	---

Peñaloza Acosta, M., Arévalo Cohén, F., & Daza Suárez, R. (2009). Impacto de la gestión tecnológica en el medio ambiente. *Revista de Ciencias Sociales*, 15(2), 306–316. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-95182009000200010

Prana Air. (2022, 29 de diciembre). *¿Qué es el material particulado (PM)?* <https://www.pranaair.com/es/what-is-particulate-matter-pm/>

Prometec. (2023). *Detector de partículas SDS011*. <https://www.prometec.net/detector-de-particulas-sds011/>

Rsuagued. (2020, 24 de abril). *Arduino*. Blog de Tecnologías. <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/rsuagued/arduino/>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Fuentes de contaminación atmosférica*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2024, 29 de agosto). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM)*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>

Sensores DHT11 con PCB y sin PCB. (s. f.). *Google Imágenes*. <https://images.app.goo.gl/unweHk3jkhJ6GEVG8>

TecScience. (2025, 2 de junio). *Sensores ambientales inteligentes: qué son*. <https://tecscience.tec.mx/es/divulgacion-ciencia/sensores-inteligentes-ambientales/>

Tene, R. C. C., & Fernández, E. P. (2025). Análisis del impacto ambiental del material particulado PM10 y PM2.5 en zonas urbanas e industriales: Propuesta de tecnologías para su

	<p>monitoreo y control. <i>Código Científico Revista de Investigación</i>, 6(E1), 576–595. https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/ne1/703</p> <p>Tutoriales, C. (2024, 4 de noviembre). <i>Detector de partículas de polvo con sensor GP2Y1010AU0F</i>. RogerBit. https://rogerbit.com/wprb/2024/11/detector-de-polvo</p> <p>U.S. Environmental Protection Agency. (2025, 24 de junio). <i>Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)</i>. https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles</p> <p>U.S. Environmental Protection Agency. (2025, 7 de abril). <i>Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente</i>. https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente</p> <p>UNIT Electronics. (2025a, julio). <i>PMS5003 sensor de calidad de aire PM2.5 - UNIT Electronics</i>. https://uelectronics.com/producto/pms5003-sensor-de-calidad-de-aire-pm2-5/#:~:text=INFORMACI%C3%93N,laboratorios%2C%20hospitales%20incluso%20en%20hogares</p> <p>UNIT Electronics. (2025b, julio). <i>Sensor Nova PM SDS011 láser calidad de aire</i>. https://uelectronics.com/producto/sensor-nova-pm-sds011-laser-calidad-de-aire</p> <p>UNIT Electronics. (2025c, 30 de junio). <i>Sensor de temperatura DHT22 AM2302 - UNIT Electronics</i>. https://uelectronics.com/producto/sensor-de-temperatura-dht22-am2302/?srsltid=AfmBOord4pSI5p-sgEWvwIxNFJqEnC10CGit1gYTA6D5y0ItUNJI6TKA</p> <p>UNIT Electronics. (2025d, julio). <i>LM35 sensor de temperatura - UNIT Electronics</i>. https://uelectronics.com/producto/lm35-sensor-de-temperatura/?srsltid=AfmBOoo744TikaKJGU0y-C4Lf5EJfK4sSPWZ0wTLNiiWGDPYZm4QJKAp</p>
--	---

	<p>Yañez, C. (2025, 19 de febrero). <i>Qué es IDE de Arduino y qué se puede hacer con él</i>. CEAC. https://www.ceac.es/blog/que-es-el-ide-de-arduino-en-robotica</p> <p>Tzintzun Cervantes, M. G., Rojas Bracho, L., & Fernández Bremauntz, A. (2005). <i>Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas</i>. <i>Gaceta Ecológica</i>, (74), 15–28. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53907402</p>
--	--

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
México