



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIA DE LA ELECTRONICA

**“CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS DE MONITOREO
PM_{2.5} DE BAJO COSTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE”**

22 DE MARZO DEL 2024

Tesis

PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA

TOMAS CARRASCO FUENTES

DIRECTOR DE TESIS

DR. MARCO ANTONIO MORA RAMÍREZ

CODIRECTOR DE TESIS

DR. ERICK JAVIER JIMÉNEZ TENORIO

Índice

Resumen.....	4
Abstract.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
1. Introducción.....	9
2. Problema.....	10
3. Justificación.....	11
4. Hipótesis.....	12
5. Objetivo.....	12
5.1 Objetivos específicos.....	12
6. Marco Teórico.....	14
6.1 Material particulado.....	14
6.2 Efectos en salud y Normas.....	14
6.3 Monitoreo de contaminantes en la ciudad de Puebla.....	15
6.4 Técnicas de medición de partículas.....	17
6.4.1 Monitor de medición continua de partículas ambientales.....	17
6.4.2 Sensores de PM2.5 de bajo costo.....	18
6.5 Modelos y métodos para complementar el monitoreo de la calidad del aire.....	20
6.5.1 Modelos de regresión lineal del uso de la tierra.....	21
6.5.2 Métodos de interpolación determinista.....	21
6.5.3 Geoestadística.....	21
6.5.4 Sensores móviles.....	22
7. Metodología.....	24
7.1 Especificaciones técnicas de los sensores.....	25
7.1.1 Geolocalización.....	25
7.1.2 Sensor de Temperatura y humedad.....	28
7.1.3 Sensor de partículas PM2.5.....	32
7.1.4 Módulo RTC DS3231.....	35
7.1.5 Interfaz de visualización de datos.....	38
7.1.6 Almacenamiento de datos.....	42
7.2 Implementar y construir dispositivos de medición.....	45
7.2.1 Selección de placas de desarrollo, proceso de programación y ensamble.....	46

7.2.2	Diseño de las carcasas de los DM y DE.....	49
7.3	Inter comparación de DM	52
7.3.1	Consumo de energía de los dispositivos	53
7.4	Mediciones en el sitio de referencia.....	55
7.5	Mediciones Móviles Pedestres	55
8.	Resultados	58
8.1	Conexiones de los sensores en las tarjetas tarjeta de desarrollo con microprocesador ATmega328P	58
8.2	Construcción de las carcasas	61
8.3	Reproducibilidad e Inter comparación de mediciones con los DM	62
8.3.1	Tiempo de autonomía de las baterías.....	65
8.4	Mediciones en el sitio de referencia.....	66
8.5	Mediciones móviles	69
9.	Conclusiones	83
10.	Referencias.....	86

Resumen

En las zonas urbanas la población de manera frecuente y sistemática está expuesta a la inhalación de partículas finas ($PM_{2.5}$) mientras se traslada a sus lugares de trabajo o realiza sus actividades en espacios públicos. Por esta razón es importante utilizar dispositivos que permitan medir las concentraciones de $PM_{2.5}$. Los sensores de bajo costo (SBC) son una tecnología emergente que brinda la posibilidad de realizar estas mediciones. Sin embargo, antes de utilizarlos es necesario realizar pruebas de calibración para el aseguramiento de la calidad de los datos que estos pueden ofrecer. En este trabajo se presentan detalles sobre la construcción, programación y calibración de dispositivos equipados con SBC, y resultados preliminares de mediciones experimentales pedestres en calles y avenidas del centro histórico de Puebla. Los resultados muestran que además de las emisiones vehiculares, la resuspensión de partículas por automóviles es un tema importante, y se observó en mayor magnitud en los cruces peatonales donde las personas se detienen a esperar el cambio de luz en el semáforo. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ en varias zonas rebasan los niveles permitidos.

Abstract

In urban areas, the population is frequently and systematically exposed to inhalation of fine particles ($PM_{2.5}$) while traveling to their workplaces or carrying out their activities in public spaces. For this reason, it is important to use devices that allow measuring $PM_{2.5}$ concentrations. Low-cost sensors (SBC) are an emerging technology that can make these measurements possible. However, before using them, it is necessary to perform calibration tests to ensure the data quality they can offer. This work details the construction, programming, and calibration of devices equipped with SBC and shows preliminary results of pedestrian measurements on streets and avenues in the historic center of Puebla. The results show that in addition to vehicular emissions, the resuspension of particles by automobiles is an important issue and was observed to a greater extent in pedestrian crossings where people stop to wait for the light to change at the traffic light. $PM_{2.5}$ concentrations in several areas exceed permitted levels.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre la Licenciada Estrella Fuentes Matus por todo el apoyo brindado, por ser un ejemplo para mí, por su amor inquebrantable, sus consejos, paciencia en cada decisión tomada y sacrificio, lo cuales me permitieron llegar hasta este momento. A mi hermana Esmeralda Carrasco Fuentes, cuya compañía, amor, ánimo, consejos y existencia me han motivado en los momentos más desafiantes de esta travesía académica. A mi padre, que en paz descanse, el Ingeniero Tomas Carrasco Felipe, por sus anécdotas, sus consejos, apoyo y amor incondicional hasta el final de sus días. Este logro es un tributo a su contribución a mi crecimiento y desarrollo.

Tomas Carrasco Fuentes.

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi profundo agradecimiento a mis asesores, el Dr. Marco Antonio Mora Ramírez y al Dr. Erick Javier Jiménez Tenorio, su apoyo, conocimientos, valiosas sugerencias y consejos han sido fundamentales en el desarrollo de mi proyecto de tesis. Estoy sinceramente agradecido por su orientación y su dedicación en cada etapa de este viaje académico.

Además, deseo agradecer a mi institución, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por proporcionarme una educación de calidad y las herramientas necesarias para mi crecimiento académico. La BUAP ha sido un faro de conocimiento y de oportunidades, y estoy profundamente agradecido por la facilidad con la que me ha otorgado los medios necesarios para alcanzar mis metas académicas.

Asimismo, quiero extender mi gratitud a los distinguidos miembros del jurado, el Dr. Luis Armando Moreno Coria, el Dr. Jorge Dionisio Fierro Rojas y el Dr. Osvaldo López Hernández. Su generosidad al compartir su tiempo, necesaria orientación y paciencia, han sido cruciales para mejorar significativamente este proyecto.

En este camino de aprendizaje y descubrimiento, también agradezco a mi familia y amigos por su apoyo incondicional y su constante estímulo. Sus palabras de ánimo y comprensión me han sostenido a lo largo de este desafiante recorrido.

Adicionalmente, deseo expresar mi agradecimiento al programa Delfín por su apoyo y contribución invaluable a este trabajo. Su respaldo ha sido un factor clave en el éxito de este proyecto de investigación.

Finalmente, mi sincero agradecimiento a todos aquellos que, de una forma u otra, contribuyeron a la realización de este trabajo. Su influencia ha dejado una huella imborrable en mi desarrollo académico.

Mi tesis es un testimonio de la colaboración, el esfuerzo y la dedicación de muchas personas, y a todos ustedes les debo un profundo agradecimiento. Gracias por ser parte de este viaje y por hacerlo posible.

1. Introducción

La exposición prolongada o de manera recurrente a partículas suspendidas en el aire de diámetros menores $5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) genera diversas enfermedades respiratorias y es causa de muertes prematuras en el mundo (Cohen et al., 2017), convirtiéndose en un grave problema de salud pública (Im et al., 2023). En las zonas urbanas el tiempo que emplean las personas para acudir a sus lugares de trabajo es cada vez más un factor para considerar en términos del tiempo y la frecuencia a la exposición de contaminantes atmosféricos. Para determinar los niveles de exposición de la población a $\text{PM}_{2.5}$, mientras caminan en vías urbanas, es necesario utilizar dispositivos móviles (Maldonado, 2009) Para medir la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ y prevenir a la población sobre sus efectos, generalmente los gobiernos locales de las ciudades del mundo realizan de manera sistemática mediciones de las concentraciones ambientales de $\text{PM}_{2.5}$ empleando estaciones de monitoreo fijas. Sin embargo, las mediciones de la calidad del aire a través de las estaciones de monitoreo implican costos significativos de instalación, operación y mantenimiento que limitan su número y por lo tanto la disponibilidad espacial de datos de calidad del aire, especialmente en países con ingresos bajos y medianos (Cromar et al., 2009; Desouza et al., 2021). Así mismo, la representatividad de las mediciones de un sitio de monitoreo fijo es válida en un radio menor a 3 km, y no es capaz de detectar puntos de altas concentraciones, o cambios súbitos en las concentraciones, como si pudiese hacerlo el monitoreo móvil. Para resolver esta problemática, varias naciones han optado por el uso de tecnologías emergentes, específicamente a través de dispositivos móviles que incorporan sensores de bajo

costo (SBC) para medir $PM_{2.5}$ (Khreis et al., 2022; Pang et al., 2021). Los SBC para medir $PM_{2.5}$ pueden ayudar a cubrir brechas espaciales y temporales respecto a los datos de las estaciones de monitoreo convencionales. Así mismo son un elemento indispensable para determinar la exposición de los peatones mientras caminan en las vías urbanas. En este contexto representan una oportunidad para generar información valiosa que permita mejorar la comprensión y comunicación de la calidad del aire a la población (Feenstra, 2020; Gao et al., 2015; Lee et al., 2019; X. Liu et al., 2020).

2. Problema

La ciudad de Puebla tiene una población de aproximadamente 3.2 millones de personas y es actualmente uno de los principales polos de desarrollo del centro-este de México. En ella asisten estudiantes de estados vecinos a sus prestigiosas universidades: BUAP, UDLAP, Ibero, entre otras. De igual manera, más de la mitad (67% en 2022) de la población económicamente activa trabaja en el comercio informal. Lo anterior implica una exposición de la población de manera frecuente y sistemática a $PM_{2.5}$ mientras se traslada a sus lugares de trabajo o realiza sus actividades en espacios públicos. Sin embargo, no se han realizado estudios sobre la exposición de los peatones a $PM_{2.5}$ en vías urbanas para la ciudad de Puebla. Además, la red de monitoreo de la ciudad de Puebla hoy en día cuenta con un número limitado de sitios de monitoreo (cinco), es decir tiene poca cobertura espacial y temporal, debido a los altos costos de mantenimiento, operación e implementación. Ambas circunstancias han impedido mejorar el entendimiento del problema de la contaminación del aire, limitando la precisión de los avisos a la

población para prevenir sobre niveles de riesgo por exposición a $PM_{2.5}$ y que finalmente ha obstaculizado la toma de decisiones informadas en la mejora de la calidad del aire y en la gestión efectiva de la contaminación por partículas finas en la ciudad de Puebla. Los SBC son una de las opciones para determinar la calidad del aire (por partículas) a la que están expuestos los peatones. Sin embargo, los SBC están limitados por una vida útil relativamente corta y su exactitud puede ser afectada por interferencias debido al tipo de meteorología y a la composición ambiental. En este contexto la calibración es fundamental, pero requiere evaluaciones sitio por sitio, equipos de referencia y algoritmos de calibración. En este entorno, esta investigación plantea el uso de dispositivos móviles equipados con SBC calibrados que logren mediciones de $PM_{2.5}$ equiparables a las mediciones de los sitios de monitoreo y con ello garantizar la realización de mediciones móviles de $PM_{2.5}$ a nivel peatonal en las vialidades de la zona centro de la ciudad de Puebla.

3. Justificación

La medición de $PM_{2.5}$ es recomendable para la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas públicas eficaces que promuevan la mejora de la salud pública. Hasta donde sabemos no existen estudios sobre la exposición a $PM_{2.5}$ de peatones en la ciudad de Puebla. Al mismo tiempo el potencial incremento del número de estaciones de monitoreo se enfrenta a desafíos debido a los altos costos asociados a su adquisición y mantenimiento. En este contexto, se justifica el uso de dispositivos móviles equipados con SBC calibrados para (i) determinar por primera vez las concentraciones de $PM_{2.5}$ en algunas vías urbanas de la zona centro de la ciudad de Puebla, (ii) caracterizar las fuentes causantes de las concentraciones

elevadas de $PM_{2.5}$ e (iii) identificar sitios recurrentes con altas concentraciones de $PM_{2.5}$ en las vialidades urbanas de la zona centro de la ciudad de Puebla. Los resultados de esta investigación podrían ser de ayuda para plantear más adelante el uso de esta tecnología (sensores calibrados) para fortalecer y complementar de manera económica y accesible la red de monitoreo de la ciudad de Puebla.

4. Hipótesis

Las mediciones con dispositivos móviles equipados con SBC previamente calibrados pueden determinar las concentraciones de $PM_{2.5}$ en vías urbanas de la ciudad de Puebla.

5. Objetivo

Diseñar, construir y calibrar dispositivos móviles equipados con SBC para el monitoreo georreferenciado de $PM_{2.5}$, temperatura y humedad para categorizar las fuentes de emisión más comunes que deterioran la calidad del aire e identificar los lugares frecuentes donde se observen niveles de concentraciones de $PM_{2.5}$ elevados en vías urbanas de la ciudad de Puebla.

5.1 Objetivos específicos

- Programar y configurar los sensores de $PM_{2.5}$, temperatura (T), humedad relativa (HR), geolocalización (GPS), tiempo (reloj) y los módulos de almacenamiento y visualización de datos (MicroSD y display)
- Diseñar y construir (i) una carcasa funcional que proteja los sensores para poder facilitar la realización de mediciones a pie y también (ii) montar los

sensores en una carcasa de plástico para poder realizar mediciones estáticas en exteriores, teniendo una protección impermeable contra la lluvia.

- Realizar pruebas de mediciones y calibración de los dispositivos para asegurar la consistencia y precisión de las mediciones para evaluar el desempeño de nuestros dispositivos de monitoreo.
- Realizar mediciones móviles a pie en diversas rutas alrededor del Centro Histórico de la ciudad de Puebla y recopilar datos para analizar la correlación entre las fuentes de emisión de contaminantes y las concentraciones de partículas PM_{2.5}

6. Marco Teórico

6.1 Material particulado

Las partículas finas, con diámetros aerodinámicos menores de $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) están hechas de compuestos sólidos suspendidos en el aire lo suficientemente pequeños para ser inhalados. Las $\text{PM}_{2.5}$ pueden penetrar al sistema circulatorio y acumularse en distintos órganos del cuerpo (Thangavel et al., 2022). Las principales fuentes de $\text{PM}_{2.5}$ en las ciudades incluyen las emisiones de vehículos a Diesel, quema de combustibles fósiles, actividades industriales, quema de biomasa y polvo suspendido en el aire. En las calles y avenidas del centro histórico de la ciudad de Puebla existe una actividad comercial y turística significativa que representa un riesgo potencial de exposición de los peatones a $\text{PM}_{2.5}$ provenientes de diversas fuentes.

6.2 Efectos en salud y normas

Las $\text{PM}_{2.5}$ no están hechas de un solo contaminante, más bien su composición corresponde a una mezcla química de especies. Esto ocasiona que la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ a corto plazo, de hasta 24h de duración, se asocie a una mortalidad prematura, aumento de ingresos a hospitales por casos cardiacos o pulmonares, bronquitis aguda y crónica, ataques de asma, visitas a urgencias, síntomas respiratorios, entre otros (Thangavel et al., 2022). Así mismo, la exposición de largo plazo (meses a años) de las personas a $\text{PM}_{2.5}$ se vincula con muertes prematuras especialmente en personas con enfermedades crónicas del corazón o enfermedades pulmonares, así como reducción de la función pulmonar en niños. Los estándares de calidad del aire ambiente definen en general los niveles de

concentraciones y exposición en el aire exterior para evitar daños a la salud humana. En el caso de Estados Unidos se consideran $12 \mu\text{g m}^{-3}$ y $35 \mu\text{g m}^{-3}$ de exposición anual y promedio de 24 horas respectivamente. En el caso de México los estándares se estipulan en la NOM-025-SSA1-2021, donde se establecen $10 \mu\text{g m}^{-3}$ y $41 \mu\text{g m}^{-3}$ de exposición anual y promedio de 24 horas respectivamente en 2023 (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2021). En el caso de la exposición a $\text{PM}_{2.5}$ de peatones, como personas que acuden a sus lugares de trabajo, o para vender o comprar alguna mercancía, es razonable suponer que la exposición se da por intervalos de tiempo regularmente muy cortos; mientras se espera el cambio de luces en el semáforo, al pasar por un comercio con quema de leña, mientras se espera en el sitio del transporte público. Sin embargo, en estos casos, también podemos suponer que este tipo de actividades son frecuentes y periódicas, y por esta razón podría existir un efecto acumulado con impactos significativos para la salud. Razón por la cual es sustancial medir las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en calles y avenidas concurridas, como las del Centro Histórico de la ciudad de Puebla.

6.3 Monitoreo de contaminantes en la ciudad de Puebla

La Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) tiene el objetivo de realizar el monitoreo y diagnóstico permanente de la Calidad del Aire y cuenta con 8 sitios de monitoreo ubicados en la ciudad de Puebla como se muestra en la Tabla 1. Los contaminantes sometidos a medición por las estaciones de monitoreo de la REMA engloban una serie de parámetros críticos en la evaluación de la calidad del aire.

Estos incluyen partículas suspendidas con diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}). Además, se monitorean componentes gaseosos esenciales como el Ozono (O₃), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el monóxido de Carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂).

Tabla 1. Ubicación de los sitios de monitoreo de la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA)

Item	Sitio de Monitoreo	Dirección	Ubicación	
			Latitud	Longitud
1	Agua Santa, (STA)	Prolongación 11 sur, Col. Agua Santa, Municipio de Puebla	18.9874	-98.2497
2	Atlixco (ATL)	Prolongación Heliotropo 1201, Col. Vista Hermosa, Municipio de Atlixco, Puebla, C.P.74218	18.9207	-98.4209
3	Benemérito Instituto del Estado (BINE)	Blvd. Hermanos Serdán No. 203, Col. Valle del Rey, Municipio Puebla C.P. 72140	19.0673	-98.2245
4	Parque de las Ninfas, (NIN)	23 poniente y 15 sur, Col. Santiago, Municipio de Puebla, C.P.72410	19.0413	-98.2143
5	San Martín Texmelucan (SMT)	Camino a la Barranca de Pesos s/n San Lucas Atoyatenco, San Martín Texmelucan C.P. 74120	19.3076	-98.4164
6	Tehuacán (TEH)	Av. Reforma Nte. 614, Villa Granada, Municipio de Tehuacán, Puebla C.P. 75732	18.4699	-97.3933

7	Universidad Tecnológica Puebla (UTP)	Calle Mariano Escobedo s/n esq. de Francisco I. Mariano Col. Joaquín Colombres C.P. 72300	19.0566	-98.1517
8	Velódromo (VEL)	Av. Zaragoza S/N entre Periférico Ecológico y Calle de las Flores, Municipio de Coronango C.P. 72680	19.1158	-98.2776

6.4 Técnicas de medición de partículas

6.4.1 Monitor de medición continua de partículas ambientales

Cada sitio de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Puebla está equipado con un instrumento para el monitoreo de $PM_{2.5}$ (y PM_{10}) como el que se muestra de manera esquemática en la Figura 1. Este instrumento provee, casi en tiempo real, datos de las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ suspendidas en el aire (Ray and Vaughn, 2021). En la primera etapa el sistema aspira aire (16.7 L min^{-1}) que pasa a través de una entrada selectiva (impactador) que permite el paso únicamente de partículas de diámetros aerodinámicos menores a $10 \mu\text{m}$, y luego el aire pasa (1.67 L min^{-1}) a través de un segundo filtro (impactador) que divide las fracciones gruesas (PM_{10}) y finas ($PM_{2.5}$). El caudal que conduce las partículas finas pasa posteriormente por un separador isocinético y se divide en dos caudales de 12 L min^{-1} y 3 L min^{-1} . La primera derivación se regresa al aire ambiente. El segundo caudal (3 L min^{-1}) pasa por un filtro desecador de nylon para extraer la humedad, y llega a un filtro de recogida de muestras. El dispositivo asegura que el flujo

volumétrico se mantenga constante, realizando correcciones por cambios en la temperatura y presión ambiente.

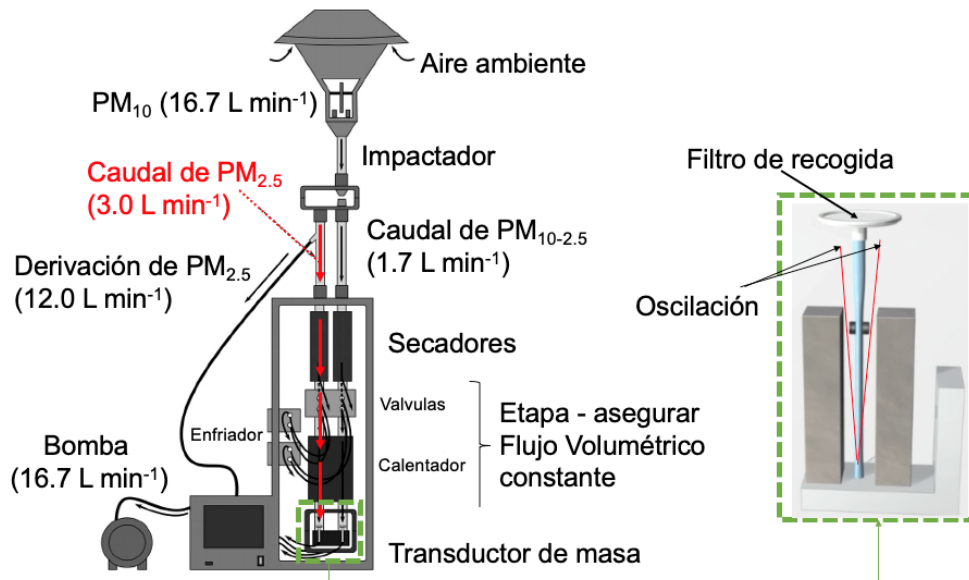


Figura 1. Representación esquemática del proceso de medición de $PM_{2.5}$ (Clements et al., 2013).

Cada filtro de recogida de muestra está unido a un transductor de masa inercial, o micro balanza (TEOM) que está pesando las muestras continuamente. A medida que las partículas se depositan sobre el filtro aumenta la masa, y cambia por lo tanto la frecuencia de oscilación. El cambio de masa del filtro se detecta como un cambio de frecuencia en la oscilación del tubo (Falcon et al 2021). Esta técnica es la que emplean los sitios de monitoreo que miden de manera permanente la calidad del aire por partículas, como el sistema de monitoreo de la REMA.

6.4.2 Sensores de $PM_{2.5}$ de bajo costo

En la última década han aparecido un número cada vez mayor de dispositivos equipados con sensores de bajo costo (SBC), cuyo principal objetivo se centra en realizar un monitoreo más personal (que el de los sitios de monitoreo) y casi en

tiempo real de la calidad del aire por partículas. De acuerdo con la definición de la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) los SBC son aquellos cuyo costo es menor a los 1000 dólares.

Debido a su bajo costo, generalmente los SBC no están certificados. Hecho que motivo el interés de la comunidad científica para evaluar sus capacidades y precisión.

Los SBC tienen diversas aplicaciones de monitoreo en aire ambiente (exteriores):

- Monitoreo de calidad del aire en exteriores
- Monitoreo de emisiones
- Terminales portuarias y de manipulación de graneles
- Monitoreo en sitios mineros
- Monitoreo de línea de cerca
- Inteligencia de hardware de IoT
- Comprobación de puntos críticos (hot-spots) de contaminación
- Monitoreo de exposición personal.

En general los SBC son sensores ópticos basados en un mecanismo de operación diferente al de los sensores analizados en la sección anterior (6.4.1). Por lo tanto, para comprender los límites y capacidades de esta clase de dispositivos, primero debemos aclarar cómo se pueden comparar o hacer referencia a sus resultados con los sistemas de medición estándar analizados anteriormente. Los SBC son una evolución o miniaturización de los contadores ópticos de partículas (COP) que utilizan la dispersión de la luz para medir la distribución del tamaño de las partículas

de materiales que consisten en partículas finas, según la teoría de dispersión de Mie (Caro et al., 2021; Rico Soto et al., 2018). A continuación, se analizan los principios operativos físicos detrás. Cuando una partícula pasa a través de un haz de luz, parte de la luz se desvía de su trayectoria original (dispersión). La dispersión es un proceso que resulta a su vez de tres efectos que se pueden superponer: reflexión, refracción y difracción, que en suma pueden aprovecharse para detectar el paso de partículas y constituyen la base del funcionamiento operativo de la mayoría de los SBC. En 1906, Gustav Mie desarrolló una teoría general que describía rigurosamente la interacción luz-partícula; consideraba las partículas como esferas de diversos tamaños dispersas en cualquier medio. La teoría de Mie predice la intensidad característica de la luz dispersada de acuerdo con el patrón de dispersión, y analizando esta característica se puede determinar la distribución de tamaños de partículas. Es importante resaltar que los SBC para medir partículas, se pueden colocar para reforzar las mediciones de instrumentos certificados, como el que se describió en la sec. 6.4.1, y producir de manera sistemática mediciones de la calidad del aire. Pero al mismo tiempo, dada su portabilidad y bajo costo, permiten realizar mediciones de exposición personal a material particulado en calles y avenidas.

6.5 Modelos y métodos para complementar el monitoreo de la calidad del aire

El número limitado de estaciones de monitoreo fijas es un problema que en algunos casos es subsanado en parte con la incorporación de modelos y métodos que a continuación describimos brevemente.

6.5.1 Modelos de regresión lineal del uso de la tierra

Los modelos de regresión lineal (Land use regression models; LUR) parten del supuesto de que la calidad del aire en un lugar determinado depende únicamente de las características medioambientales locales, como el uso del suelo, las variables meteorológicas, la densidad de edificación y la densidad de tráfico. Estos modelos relacionan la medición de la calidad del aire realizada en la estación fija con las variables ambientales predictoras elegidas. Particularmente este tipo de modelos se usan en áreas densamente pobladas. El modelo se basa en patrones de contaminación predecibles para estimar las concentraciones de un área en particular (Kerckhoffs et al., 2015).

6.5.2 Métodos de interpolación determinista

Uno de los métodos de interpolación determinista más populares es la ponderación de distancia inversa (IDW). El valor en el lugar desconocido se calcula como la media ponderada de las mediciones recogidas en las estaciones de control. Este método parte de la base de que el valor está más influido por las mediciones más cercanas que por las lejanas, por lo que las ubicaciones más cercanas obtienen mayor peso. A medida que aumenta la distancia, se da menos peso a la medición (Marshall et al., 2008).

6.5.3 Geoestadística

La geoestadística reagrupa los métodos de kriging estocástico, el valor en el lugar no muestreado se evalúa mediante una combinación lineal ponderada de

mediciones, y las ponderaciones se calculan a partir de la variabilidad de los datos inferida de la estructura real de los datos (Kim et al., 2014)

6.5.4 Sensores móviles

El uso de un conjunto de SBC a bordo de vehículos (bicicletas, automóviles, autobuses, tranvías, entre otros) o de manera pedestre cuando se recorren calles y avenidas de un área urbana para mejorar la representación de los contaminantes es cada vez más popular. A diferencia de las estaciones tradicionales de monitoreo de la calidad del aire, el uso de una red de SBC móviles permite monitorear de manera dinámica a través del entorno entrega datos con una resolución sin precedentes (Desouza et al., 2020). Algunos ejemplos notables de proyectos de investigación que utilizan SBC para monitorear la contaminación del aire por partículas son:

- Un estudio enfocado en caracterizar y monitorear partículas en minas a cielo abierto. El estudio se llevó a cabo en la mina de Riotinto en España, durante en el periodo 2019-2021, donde se emplearon SBC para medir las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$, para dar seguimiento a las emisiones fugitivas de partículas en el entorno minero y ayudar a que esta actividad sea más respetuosa con el medio ambiente (Zafra-Pérez et al., 2023).
- Se realizaron pruebas de intercomparación estáticas y en bicicleta, así como y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la calibración, para evaluar el rendimiento de los SBC para medir concentraciones de $PM_{2.5}$ en

exteriores mientras las bicicletas realizan distintos recorridos en una red de movilidad activa (Hassani et al., 2023).

- El proyecto, denominado Health Investigation and Air Sensing for Asian Pollution (Hi-ASAP), en la región del sudeste asiático, y busca proporcionar evidencia científica para respaldar acciones políticas efectivas contra la contaminación del aire, centrándose en $PM_{2.5}$. Este proyecto, se basa en ciencia ciudadana, que consiste en proveer de SBC ha cierto número de habitantes para realizar mediciones de $PM_{2.5}$ en su día a día, y con ello proveer de datos para evaluar fuentes de emisiones de partículas a las cuales está expuesta la población de centros urbanos específicamente: puntos calientes, exposición a “picos” de concentraciones, evaluación de impactos en salud por exposición en periodos cortos. para identificar fuentes de contaminación, evaluar puntos críticos, medir exposiciones y evaluar los impactos en la salud. Además, se menciona que los LCS (Low cost sensor) podrían contribuir a la formulación de estrategias de cambio de comportamiento y políticas de control de la contaminación. (Lung et al., 2022)

7. Metodología

La investigación adopta un enfoque cuantitativo. La Figura 2 presenta un esquema general de las etapas de la investigación. Primero se detallan las especificaciones técnicas de los sensores y componentes electrónicos (GPS, Temperatura, Humedad, Partículas, Reloj, pantalla LCD, y módulo de almacenamiento). Posteriormente se realizan las conexiones y programación de los dispositivos y se colocan en la carcasa correspondiente. Se realizan pruebas de intercomparación para verificar el rendimiento del suministro de energía y verificar si los dispositivos logran mediciones semejantes. Posteriormente, se lleva a cabo la etapa de calibración. Por último, con los dispositivos calibrados se realizan mediciones móviles pedestres georreferenciadas de concentraciones de $PM_{2.5}$ en calles y avenidas del centro histórico de la ciudad de Puebla que permiten generar “mapas de calor” y correlacionar las frecuencias de fuentes de emisión de $PM_{2.5}$ con incrementos monitoreados. En las siguientes subsecciones se detallan cada una de las etapas.

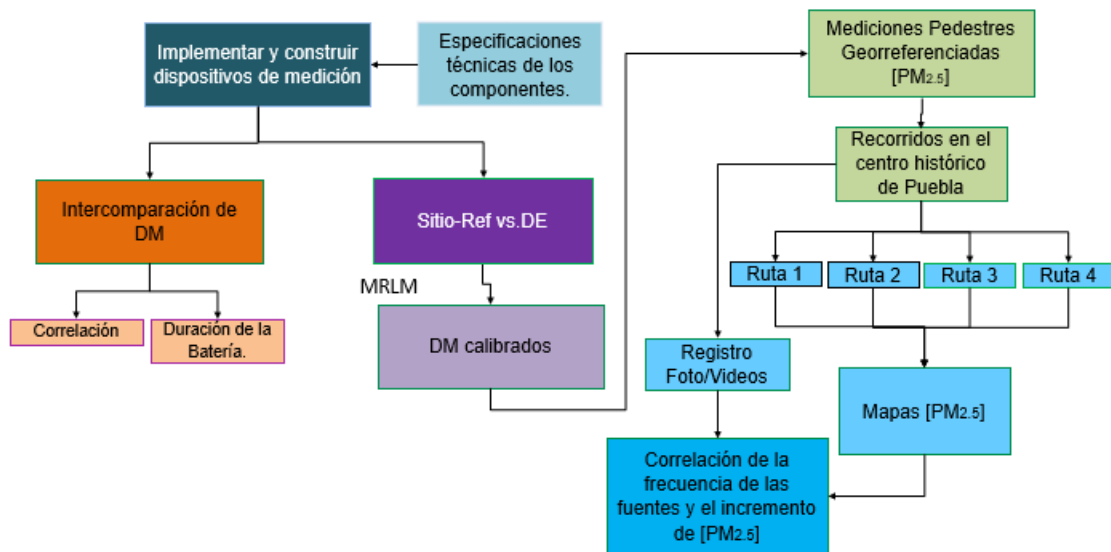


Figura 2. Esquema general de las etapas de la metodología

7.1 Especificaciones técnicas de los sensores

Las especificaciones de los sensores proporcionan información crucial sobre el rendimiento y las capacidades de cada componente que se integran en dos dispositivos, a saber, el (1) “Dispositivo para el monitoreo móvil” (DM) y para el (2) “Dispositivo de monitoreo estático” (DE) de $PM_{2.5}$.

7.1.1 Geolocalización

El módulo GPS NEO-6M es un dispositivo que utiliza un sistema de posicionamiento global (GPS) para determinar la ubicación en el DM y permite georreferenciar cada medición realizada durante los recorridos o rutas realizadas en las avenidas del centro histórico de Puebla. La ubicación de las mediciones es un dato que permite correlacionar las mediciones de $PM_{2.5}$ con las condiciones específicas de cada zona; identificando áreas de mayor concentración de contaminantes y

proporcionando una visión espacial detallada de la calidad del aire en diferentes ubicaciones (Módulo GPS e Interfaz, 2023).

Características principales del GPS

- Rango de Voltaje de Alimentación de Entrada: 4.7 V a 5.3 V
- Tiempo para la primera localización (TTFF): < 1 s
- Precisión de posición: 2 m
- Velocidad de actualización Máxima: 5 Hz
- Consumo de Energía: Corriente Máxima: 100 mA
- Corriente en Reposo: 2 mA

El módulo GPS NEO-6M se basa en recibir señales de satélites en órbita que transmiten datos de tiempo y posición. En este sentido, el módulo cuenta con un LED el cual parpadea al tener la conexión con el satélite.

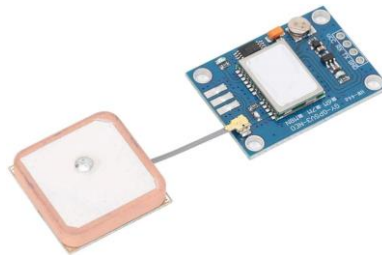


Figura 3. Módulo GPS NEO-6Mv3

Estas señales son ondas de radio que se envían desde un conjunto de satélites GPS (se requieren al menos cuatro satélites para obtener una posición precisa). Esta recepción se da gracias a una antena receptora que capta las señales de los satélites diseñada específicamente para recibir señales de frecuencia de radio

utilizadas por los satélites GPS, notando que el módulo GPS debe tener una vista clara del cielo para recibir señales adecuadas.

Una vez captadas estas señales, el módulo procesa los datos, incluyendo la demodulación y decodificación de la ubicación y el tiempo. Por medio del uso de varios satélites, y mediante el uso de algoritmos matemáticos y trigonométricos el módulo GPS calcula la posición (latitud y longitud) del receptor. Después de recibir los datos el microcontrolador, a través de una comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) este es un protocolo de comunicación serial asíncrona que permite la transmisión y recepción de datos de forma serie entre dispositivos (Kharisma et al., 2019). El módulo utiliza el protocolo NMEA (National Marine Electronics Association) que es ampliamente utilizado para la comunicación de datos entre equipos electrónicos, especialmente en aplicaciones de navegación y posicionamiento (posición, velocidad, tiempo y otros detalles). Por ejemplo,

Algunas oraciones NMEA comunes que emite el módulo GPS NEO-6M son:

- GPGGA: Proporciona datos de posición y calidad de la señal.
- GPGSA: Ofrece datos de la calidad de la solución y la geometría del satélite.
- GPGSV: Da detalles sobre los satélites visibles.
- GPRMC: Suministra datos de fecha, hora, velocidad y dirección.

La combinación de la interfaz UART y las oraciones NMEA es comúnmente utilizada para obtener información precisa de ubicación. Las bibliotecas *Wire.h*, *LiquidCrystal_I2C.h* y *TinyGPS++.h* permiten visualizar más fácilmente los datos de la ubicación (Kharisma et al., 2019; Módulo GPS operando con MATLAB). El módulo GPS no requiere calibración ya que internamente el chip GPS a través de

algoritmos complejos y correcciones de tiempo y posición proporcionadas por los satélites GPS las realiza.

7.1.2 Sensor de Temperatura y humedad

El sensor DTH11 registra la temperatura y humedad relativa (RH) y tiene las siguientes características:

- Voltaje de alimentación: 3.5 a 5.5 VDC
- Corriente típica en operación: 300 μ A
- Corriente típica en reposo: 60 μ A
- Rango: 20 a 90 % RH
- Precisión: \pm 5% RH
- Rango: 0 a 50 °C
- Precisión: \pm 2 °C
- Resolución: 1% HR, 1°C
- Frecuencia de muestreo: 0.5 Hz
- Interfaz de 4 conexiones: VDD, DATA, NC y GND.
- Tiempo de respuesta: Aproximadamente 6 segundos (25 °C, 1 m/s de aire)

El interior del sensor DTH11 contiene un termistor, que es un tipo de resistor cuya resistencia cambia con la temperatura. En el caso del DHT11, es un termistor de óxido de titanio. La resistencia eléctrica de este termistor cambia de manera predecible con la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, la resistencia disminuye y viceversa. El voltaje de salida del termistor varía en función de la temperatura. Este voltaje es convertido a una señal digital a través de un convertidor analógico a digital (ADC). La cantidad de bits en la salida digital determina la

resolución de la medición de temperatura. Además, tiene un circuito de resistor pull-up interno para mantener la línea de datos en un estado alto. Un resistor pull-up es simplemente un resistor conectado entre la línea de datos y la fuente de alimentación (Vcc). Este resistor tiene un valor alto (5-10 k Ω) para mantener la línea de datos en un estado alto (en Vcc) cuando ningún otro dispositivo está transmitiendo (Sonawane et al., 2019). El resistor pull-up interno asegura que la línea de datos se mantenga en un estado lógico alto cuando no está transmitiendo datos. Durante la comunicación, tanto el DHT11 como el microcontrolador "leen" y "escriben" en esta línea de datos. El resistor pull-up asegura que, cuando ninguno de los dispositivos está transmitiendo, la línea se mantenga en un estado alto (1 lógico) esencial para mantener una comunicación fiable entre el sensor y el microcontrolador al asegurar que la línea de datos esté en un estado conocido cuando no se está transmitiendo información.

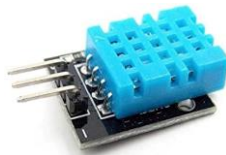


Figura 4. Sensor DHT11 para medir temperatura y humedad relativa

El sensor envía datos al microcontrolador utilizando una transmisión de datos serie de 1-wire. La comunicación se realiza utilizando una única línea de datos en forma de pulsos eléctricos. Para enviar un bit "1", el DHT11 mantendrá la línea de datos alta durante un cierto período de tiempo y luego la bajará para indicar la transición. Para enviar un bit "0", mantendrá la línea baja durante un cierto período de tiempo y luego la subirá. Estos pulsos eléctricos son interpretados por el microcontrolador del DHT11 y por el microcontrolador del dispositivo al que está conectado el DHT11

en este caso una placa de desarrollo con microprocesador ATmega328P. A través de estos pulsos, los datos sobre temperatura y humedad se transmiten desde el DHT11 al microcontrolador externo. Para generar datos de humedad el DHT11 también cuenta con un higrómetro que basado en la variación de la capacitancia del polímero de óxido metálico con respecto a la humedad ambiente (Adhiwibowo et al., 2020). Para el inicio de la comunicación entre el microcontrolador y el sensor DHT11, el microcontrolador envía una señal de inicio indicando que este desea recibir datos este pulso tiene una duración de al menos 18 milisegundos y su objetivo es “despertar” al sensor y prepararlo para recibir instrucciones, para posteriormente el DHT11 responder que está listo para enviar los datos de temperatura y humedad. El DHT11 transmite 40 bits de datos en total al microcontrolador, que serán divididos en 5 bytes, el primer byte representa la parte entera de la humedad, el segundo representa la parte decimal de la humedad, el tercero la parte entera de la temperatura, el cuarto su parte decimal y el último byte, el byte de verificación (checksum), es la suma de los primeros cuatro bytes. El checksum es un cálculo realizado por el DHT11 en función de los datos transmitidos, también conocido como byte de verificación. Si este cálculo coincide con el checksum transmitido por el DHT11, se puede asumir que los datos son precisos y no han sido corrompidos durante la transmisión, si no coinciden, indica que ha habido un error en la transmisión y los datos no son confiables.

En resumen, el funcionamiento general del sensor de temperatura y humedad es:

1. El sensor DHT11 lee la temperatura y la humedad ambiente utilizando su termistor.
2. La lectura analógica se convierte en una señal digital usando su ADC interno.

3. El microcontrolador dentro del DHT11 procesa la señal digital y la convierte en un formato legible.
4. La información se envía al microcontrolador externo (placa de desarrollo con microprocesador ATmega328P) a través de un protocolo de comunicación simple.
5. El microcontrolador externo procesa los datos recibidos y los utiliza según sea necesario en el proyecto. En este caso se almacenan en la microSD y se despliegan en pantalla.

Los sensores DHT11 suelen estar calibrados en fábrica, lo que significa que se ajustan para dar dentro de ciertos límites especificados por el fabricante. Algunos fabricantes pueden lanzar actualizaciones de firmware para los sensores DHT11. Estas actualizaciones pueden incluir mejoras en la precisión o en la forma en que se manejan las mediciones. Cada sensor DHT11 tiene una tolerancia específica que indica cuánto puede variar la medición de la temperatura y la humedad. Esta tolerancia puede variar ligeramente de un sensor a otro y suele estar en el rango de ± 1 a ± 2 grados Celsius para la temperatura y $\pm 5\%$ para la humedad. Sin embargo, la calibración se puede hacer manual comparando las lecturas del DHT11 con lecturas de otros sensores más precisos y aplicar una compensación en el software para corregir las diferencias, también hay que tener en cuenta que el sensor esté funcionando dentro de las condiciones recomendadas las cuales son evitar temperaturas extremas, exposición directa al sol, humedad excesiva y corrientes de aire (Sonawane et al., 2019). Si el sensor tiende a mostrar un error específico bajo ciertas condiciones, se puede aplicar una compensación en tu software para corregir

estos errores conocidos. La Tabla 2 resume detalles de operación de otras alternativas para la medición de temperatura y humedad.

Tabla 2. Características de sensores de temperatura y humedad.

Sensor	Rangos de operación		Tolerancias
	Temperatura	Humedad	
	(°C)	(%)	
DHT11	[0;50]	[20;90]	±1°C y ±1%
DHT22 (AM2302)	[-40; 80]	[0;100]	±0.5°C y ±2-5%
DS18B20	[-55; 125]	NA	±0.5°C y NA
BME280	[-40; 85]	[0;100]	--
HTU21D	[-40; 125]	[0;100]	±0.3°C y ±2%

El DHT11 es una elección adecuada para nuestro proyecto dado que no se requiere una precisión tan alta y al mismo tiempo ofrece una solución asequible.

Finalmente, el sensor DHT11 requiere de un mantenimiento que se limita a limpiar los pines y evitar daños visibles, y protegerlo de la humedad excesiva. Además, debe evitarse la exposición a temperaturas extremas, ya que esto podría afectar su rendimiento temporalmente

7.1.3 Sensor de partículas PM2.5

El sensor de partículas PM_{2.5} también conocidos como SDS011 tiene las siguientes características:

- Salida: PM_{2.5}, PM₁₀
- Rango de Medición: 0.0-999.9 µg m³

- Voltaje de Entrada: 4.7V a 5.3V
- Corriente Máxima: 100mA
- Corriente en Reposo: 2mA
- Frecuencia de Salida de Datos en Serie: 1 vez por segundo
- Error Relativo: 15% $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Rango de Temperatura: -20 a 50°C
- Resolución mínima de detección de partículas de polvo: 0,3 μm
- Rango de medición:
 - PM2.5: Entre 0 y 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
 - PM10: Entre 0 y 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Resolución: 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Tiempo de respuesta: Aproximadamente 1 segundo

El sistema del sensor SDS011, ver Figura 5, se basa en tomar una muestra del aire ambiental que contiene las partículas en suspensión hacia el interior mediante un ventilador del sensor que lo succiona a su interior para su posterior análisis. Este aire entra en la cámara de medición donde se encuentran el láser y los fotodiodos.



Figura 5. Sensor de partículas PM_{2.5} Nova SDS011

El láser emite luz a una longitud de onda específica, típicamente en el rango del infrarrojo cercano, es importante tener en cuenta que el SDS011 utiliza dos láseres, uno con una longitud de onda de 650 nm y otro con una longitud de onda de 780

nm, adecuadas para la detección de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} . La elección de la longitud de onda es fundamental porque determina cómo las partículas en suspensión interactuarán con la luz. En este caso, la luz láser es dispersada por las partículas presentes en el aire para que posteriormente dos fotodiodos colocados en ángulos específicos con respecto al haz de luz láser midan la luz dispersada por las partículas. El primer fotodiodo mide la luz dispersada en una dirección específica que permite estimar el número de partículas más grandes, el segundo mide la luz dispersada en otra dirección, permitiendo estimar el número de partículas más pequeñas (Nothhelfer et al., 2023). La cantidad de luz recibida por estos fotodiodos está relacionada con la cantidad y tamaño de las partículas en el aire. Por lo tanto, midiendo la luz recibida, se puede determinar la concentración y distribución de tamaños de partículas en el aire. Después de que los fotodiodos miden la luz dispersada proveniente de las partículas en suspensión, se inicia el proceso de procesamiento de señal. Por medio del microcontrolador (debe estar configurado para recibir y procesar los datos configurar la velocidad de transmisión baud rate) se realiza el procesamiento de las señales provenientes de los fotodiodos, en algunos casos, es posible que se utilice un Convertidor Analógico-Digital (ADC) en el sensor SDS011. Cuando el microcontrolador recibe las señales de los fotodiodos, utiliza algoritmos y ecuaciones basados en principios ópticos y matemáticos para calcular la concentración de partículas en el aire que establecen relaciones entre la luz dispersada y las características de las partículas. Esto implica traducir la cantidad de luz dispersada que llega a cada fotodiodo en información sobre la cantidad y tamaño de partículas en suspensión en el aire. Una vez se han recopilado los datos, se envían a través de una interfaz de comunicación. Esta interfaz es

típicamente digital y puede ser UART, UART-TTL o USB, por mencionar algunos. Esta elección de interfaz permite una comunicación con otros dispositivos, como microcontroladores, computadoras u otros sistemas de monitoreo (Badura et al., 2018). La información se envía en un formato específico de trama de datos, que incluye cabeceras y sumas de verificación (checksums) para garantizar la integridad de los datos. El sensor transmite datos en intervalos regulares que se pueden configurar. La frecuencia de transmisión se puede ajustar según los requisitos de la aplicación, en nuestra investigación se consideró un dato cada dos segundos. Es importante realizar un mantenimiento básico, como limpiar el puerto de entrada de aire y protegerlo de la exposición prolongada a condiciones adversas para garantizar mediciones precisas a lo largo del tiempo. Así mismo, nótese que el sensor tiene un año de vida útil de acuerdo con el fabricante, después del cual es importante verificar y si es necesario, recalibrar el sensor para asegurarse de que las mediciones sigan siendo precisas. Esto puede hacerse comparando las lecturas del sensor con un equipo de referencia calibrado (Liu et al., 2019).

7.1.4 Módulo RTC DS3231

Para lograr caracterizar las concentraciones de $PM_{2.5}$ es imprescindible vincular las mediciones con el momento (hh:mm:ss) en que estas se realizan. El módulo Real-Time Clock (RTC DS3231) proporciona una marca de tiempo para cada medición realizada, ver Figura 6.



Figura 6. Reloj RTC DS3231

Este módulo usa un cristal de cuarzo que tiene una frecuencia de vibración estable para generar una señal precisa que se utiliza como base para medir el tiempo. Dichas señales o pulsos del cristal se cuentan en binario, lo que permite la medición del tiempo en formatos de hora, minuto, segundo (hh:mm:ss) y día, mes y año (dd:mm:yyyy). Sin embargo, la medición puede ser alterada por el cambio de temperatura, por lo que el módulo del DS3231 tiene una compensación de temperatura incorporada. Los circuitos ajustan la frecuencia del reloj en función de la temperatura para garantizar la calidad de la medición independientemente de las variaciones térmicas, y cuenta con una batería de respaldo para mantener la hora en tiempo real aún sin la presencia de alimentación eléctrica.

El módulo RTC DS3231 se comunica con un microcontrolador o un sistema embebido a través de un protocolo de comunicación serie. Específicamente el protocolo de Interfaz de Dispositivo Serial Periférico o Inter-Integrated Circuit (I2C o IIC). Este protocolo maestro esclavo (comunicación serie), permite la comunicación entre varios dispositivos en un bus de comunicación utilizando solo dos líneas una para transmisión de datos (SDA - Serial Data Line) y otra para transmisión de la señal de reloj (SCL - Serial Clock Line). El funcionamiento de este proceso de comunicación inicia cuando el maestro (microcontrolador) comienza la

comunicación para escritura colocando la señal SDA en un estado bajo (bit de inicio) mientras SCL está en un estado alto (espera), luego el maestro envía la dirección del dispositivo esclavo y el bit de escritura (0) en la línea SDA, después el maestro envía los datos que quiere escribir en el dispositivo esclavo. Para el caso de lectura de datos es similar a la escritura, el maestro inicia la comunicación colocando SDA en un estado bajo mientras SCL está en un estado alto, posterior a esto envía la dirección del dispositivo esclavo y el bit de lectura (1) en la línea SDA, este último envía los datos al maestro (Protocolo I2C, 2023).

Ahora bien, si se requiere hacer el ajuste del tiempo, esto se hace mediante código usando un microcontrolador, compensando las variaciones de tiempo agregando o restando una cantidad determinada de segundos, minutos, horas, etc., en cada actualización de la hora. La abundante documentación y la comunidad activa respaldan el módulo DS3231 lo que lo hace una opción viable para su implementación en este proyecto.

En comparación con alternativas como DS1307 o MCP7940, el DS3231 generalmente supera en precisión (Exactitud Reloj: 2ppm), durabilidad (la batería funcional por 10 años) estabilidad y compensación de temperatura, lo que lo convierte en una elección sobresaliente para aplicaciones donde la exactitud del tiempo es fundamental. El mantenimiento requerido en su vida útil es en el cambio de baterías para garantizar una alimentación continua y verificar la precisión del dispositivo periódicamente.

7.1.5 Interfaz de visualización de datos

La Figura 7 muestra la pantalla LCD I2C del dispositivo de bajo costo que proporciona una interfaz directa para visualizar los datos en tiempo real. Esto permite una revisión inmediata de las mediciones y proporciona retroalimentación sobre la calidad del aire en la ubicación donde se encuentra el dispositivo. Además, facilita ajustes y cambios en la configuración, lo que es útil durante la fase de calibración y para asegurar que el equipo funcione correctamente durante las mediciones.



Figura 7. Display para visualización de datos LCD I2C

Las características principales de la pantalla LCD I2C:

- Tipo: Pantalla LCD alfanumérica de 16 caracteres x 2 líneas
- Tensión de alimentación: Generalmente 5 V, otros modelos pueden funcionar con 3.3 V
- Interfaz: I2C, utiliza solo dos pines del Arduino para la comunicación
- Retroiluminación: Puede tener retroiluminación LED
- Caracteres: Soporta caracteres alfanuméricos y algunos símbolos especiales.

La pantalla LCD I2C es una pantalla de cristal líquido que muestra caracteres alfanuméricos. El protocolo de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit), proporciona una solución de visualización para proyectos de Arduino. Este protocolo de comunicación serial emplea dos líneas: SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock) para transferir datos entre dispositivos. Al utilizar esta interfaz, el módulo LCD I2C se conecta al Arduino con solo cuatro cables: alimentación (VCC), tierra (GND), datos (SDA), y reloj (SCL). La simplicidad de estas conexiones reduce la posibilidad de errores y simplifica la integración (Protocolo I2C, 2023; Display LCD I2C, 2023). Cuenta con un adaptador LCD I2C que es un módulo que se conecta a la pantalla LCD y convierte los datos I2C del microcontrolador en los datos paralelos necesarios para la pantalla LCD. El chip expensor de E/S de 8 bits PCF8574 es el que se utiliza comúnmente en estos adaptadores (Gay, 2017). Cada pantalla LCD I2C tiene una dirección I2C única que se utiliza para comunicarse con ella. La dirección predeterminada depende del fabricante y del chip que se utilice en el adaptador. Por ejemplo, si se utiliza el chip PCF8574 de Texas Instruments, la dirección I2C predeterminada es 0x27 Hex, mientras que, si se utiliza el chip PCF8574 de NXP Semiconductors, la dirección I2C predeterminada es 0x3F Hex. Su funcionamiento es mediante la biblioteca *LiquidCrystal_I2C*, una biblioteca de Arduino que se utiliza para controlar la pantalla LCD I2C. Esta biblioteca se encarga de enviar los datos a través del protocolo I2C al adaptador LCD I2C. Además, para el ajuste del brillo de la pantalla cuenta con un potenciómetro de contraste.

Para controlar una pantalla LCD I2C con Arduino, se debe seguir los siguientes pasos:

1. Conectar el adaptador LCD I2C a la pantalla LCD.

2. Conectar el adaptador LCD I2C al microcontrolador utilizando los pines SDA y SCL del protocolo I2C.
3. Descargar e instalar la biblioteca LiquidCrystal_I2C.
4. Inicializar la pantalla LCD en el programa de Arduino utilizando la dirección I2C de la pantalla y el tamaño de la pantalla.
5. Escribir los caracteres que se desean mostrar en la pantalla LCD utilizando los métodos de la biblioteca LiquidCrystal_I2C.

El módulo LCD I2C incorpora un controlador I2C, que gestiona la comunicación entre el Arduino y la pantalla. Esta característica reduce la carga en el microcontrolador y simplifica la programación.

La comunicación implica el envío de comandos y datos desde el Arduino al controlador del LCD I2C a través de la interfaz I2C. Los comandos permiten configurar el LCD, establecer la posición del cursor, borrar la pantalla y otras operaciones de control, mientras que los datos representan el contenido que se desea mostrar en la pantalla.

Antes de utilizar el módulo LCD I2C, es necesario inicializarlo mediante comandos específicos que configuran la interfaz, el tamaño del LCD y otras características según los requisitos del proyecto. Una vez inicializado, puedes enviar datos al LCD para que se muestren en la pantalla utilizando comandos específicos para controlar la posición y el contenido que se desea mostrar.

Además de estos aspectos fundamentales, hay consideraciones adicionales para optimizar el uso del módulo. Ajustar el contraste de la pantalla, cuando sea posible, es importante para lograr una legibilidad óptima. También debes seleccionar un módulo con la resolución y el tamaño de pantalla adecuados para tu aplicación

particular. El módulo LCD I2C ofrece una serie de ventajas notables en comparación con alternativas como las pantallas LCD sin I2C y las pantallas OLED. La Tabla 3 resume ventajas y desventajas del LCD I2C ante dispositivos similares.

Tabla 3. Ventajas y desventajas existentes entre pantallas

Pantalla	Ventajas	Desventajas
LCD I2C (conversor PCF8574)	<ul style="list-style-type: none"> - Pocas conexiones - Fácil Integración - Habilita otras líneas de conexión a la línea I2C. -Bajo precio 	-Posible conflicto de dirección I2C.
LCD sin I2C	<ul style="list-style-type: none"> - Amplia disponibilidad. - Bajo precio. 	- Mayor número de conexiones
Pantallas OLED	<ul style="list-style-type: none"> -Excelente calidad de imagen. -Bajo consumo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> -Más costoso que el LCD I2C. -Baja vida útil.
Pantallas TFT	<ul style="list-style-type: none"> -Colores nítidos y alta resolución. 	<ul style="list-style-type: none"> -Consumo de energías superior al LCD I2C. -Más costoso que el LCD I2C.

El LCD I2C es a menudo preferido debido a su simplicidad de conexión, ahorro de pines y fácil integración en proyectos. La simplicidad de conexión es un factor destacado. también es más fácil de entender y aplicar, lo que lo convierte en una elección atractiva, especialmente para principiantes. Esto se compara

favorablemente con la complejidad que a veces implica el manejo de una pantalla LCD que carece de un controlador I2C. En términos de fiabilidad, destaca el conversor PCF8574, que transforma señales paralelas en señales en serie I2C. Este componente es conocido por su confiabilidad y robustez, lo que proporciona una base sólida para la comunicación con el LCD. Además, el LCD I2C muestra una notable capacidad para operar en diversas condiciones ambientales, incluyendo variaciones de temperatura y humedad, sin comprometer su rendimiento y confiabilidad. En cuanto a los aspectos de mantenimiento, hay varios puntos cruciales a considerar para asegurar una transferencia de datos óptima. Estos incluyen la verificación periódica de las conexiones físicas entre el LCD I2C, el conversor PCF8574 y la placa de desarrollo con microprocesador ATmega328P, para garantizar que estén correctamente conectadas y sin daños físicos. También, es esencial mantener actualizadas las bibliotecas asociadas con el LCD I2C, lo que garantiza la compatibilidad con las últimas versiones de Arduino IDE y posibles mejoras en rendimiento y estabilidad (Akinwole & Oladimeji, 2018).

7.1.6 Almacenamiento de datos

Además de visualizar los datos en tiempo real, es importante poder almacenar toda la información para su análisis posterior. La Figura 8 muestra el lector MicroSD. En este contexto el módulo de microSD permite registrar y conservar todos los datos obtenidos durante las mediciones.

Las características principales que presenta el lector de microSD:

- Tensión de alimentación: Generalmente 3.3V o 5V.

- Interfaz: SPI (Serial Peripheral Interface) o a través de pines dedicados para lectura y escritura
- Tarjetas compatibles: Admite tarjetas microSD y microSDHC
- Velocidad de transferencia: Las velocidades de lectura y escritura pueden variar según la clase y la capacidad de la tarjeta microSD, por ejemplo, class 4 y class 10.
- Capacidad: Puede soportar tarjetas microSD de diferentes capacidades: 4GB, 8GB, 16GB y 32GB.

El dispositivo permite leer y escribir datos en la tarjeta de memoria microSD utilizando la interfaz SPI que es un protocolo de comunicación síncrona que permite la transferencia rápida de datos entre dispositivos.



Figura 8. MicroSD

El dispositivo se conecta al Arduino Uno a través de pines como MISO (Master Slave Out), MOSI (Master Out Slave In), SCK (Serial Clock), CS (Chip Select), VCC (Voltaje de Alimentación) y GND (Tierra). Los pines MISO y el MOSI manejan la transmisión de datos, el SCK sincroniza esta transmisión, el CS (o SS) se utiliza para seleccionar la tarjeta microSD para la comunicación. Cuando el pin CS está en estado bajo (LOW), se activa la tarjeta microSD y está lista para recibir comandos, esto permite que la placa de desarrollo se comuniquen con múltiples dispositivos SPI

y seleccione cuál de ellos está activo en un momento dado, el VCC proporciona energía y el GND establece una referencia de tierra común. Además, durante su comunicación se requiere enviar instrucciones específicas mediante comandos SD que se envían a la tarjeta microSD, estos comandos incluyen inicialización, lectura y escritura, así como otras operaciones relacionadas con la administración de archivos y sistemas de archivos. La inicialización de la tarjeta microSD es un proceso fundamental al comienzo de la comunicación. El establecimiento de esta comunicación implica configurar varios parámetros, como el tamaño del bloque, la velocidad de transferencia y otras configuraciones relacionadas con la tarjeta. Por ejemplo, para enviar lectura de datos de la tarjeta microSD se deben enviar comandos de lectura junto con la dirección de inicio y el número de bloques a leer para que la placa de desarrollo obtenga los datos almacenados en la tarjeta. Así mismo la escritura de datos en la tarjeta se realiza mediante comandos de escritura. placa de desarrollo envía datos y la dirección de inicio, y la tarjeta almacena la información en los bloques correspondientes. El sistema de archivos que va a permitir que el microcontrolador acceda a la tarjeta microSD como si fuera un disco duro son el FAT16 o FAT32 los cuales son para organizar y acceder a los datos almacenados en la tarjeta microSD, ya que los archivos se organizan en directorios y se acceden mediante una estructura de carpetas, lo que facilita la lectura y escritura de datos en la tarjeta. Es esencial asegurarse de que el lector de tarjetas microSD esté correctamente conectado a la placa de desarrollo y configurado para la comunicación SPI apropiada.

En general, el lector de tarjetas microSD es una excelente opción para proyectos que requieren almacenamiento de datos portátil, además acceso directo a través de

la placa desarrollo, y una solución económica y de bajo consumo de energía. La durabilidad y facilidad de uso de las microSD lo hacen ideal para aplicaciones estándar. Las alternativas, mostradas en la Tabla 4, como los lectores microSD USB o Ethernet, son útiles para aplicaciones más específicas y pueden ser más costosas.

Tabla 4. Características de dispositivo para el almacenamiento de datos

Dispositivo	Costo	Conexión	Límites de velocidad de conexión
MicroSD Arduino	Bajo	Pines SPI y pines de alimentación	Depende la configuración.
MicroSD USB	Bajo	Puerto USB	Velocidad del puerto USB
MicroSD-Ethernet	Medio	Ethernet	Velocidad de la red
SD-Wifi	Medio	Wi-Fi	Calidad de la señal Wi-Fi
MicroSD SATA	Alto	Puerto SATA	Alta

7.2 Implementar y construir dispositivos de medición

Se construyeron dos tipos de dispositivos de medición. Primero los dispositivos estáticos (DE) diseñados para colocarse a la intemperie y coleccionar datos que se utilizan para calibrar los sensores. Así mismo, se construyeron dispositivos móviles (DM) con la finalidad de realizar mediciones georreferenciadas y cuyo diseño fue en su momento el más sencillo y económico para los fines experimentales. Sabiendo que para la construcción posterior de DM para el público en general, fuera del alcance de esta investigación, se requiere el apego a normas específicas para garantizar la eficiencia, diseño, resistencia, entre otras. Los DE están constituidos

por una sola placa de desarrollo con microprocesador ATmega328P, siendo este el circuito uno (C_1) sin la necesidad de una pantalla LCD, donde están instalados los sensores de temperatura, humedad, $PM_{2.5}$, microSD y el reloj. En cambio, los DM se constituyen por dos circuitos. El primero corresponde al C_1 previamente mencionado, pero se incorpora también un segundo circuito (C_2) que incorpora los módulos GPS, reloj, display, y de almacenamiento de datos. El DM integra los dos circuitos (C_1 y C_2) con la intención de evitar la saturación de memoria y prevenir interferencias entre sensores.

7.2.1 Selección de placas de desarrollo, proceso de programación y ensamble

Para la implementación de los sensores y dispositivos de medición, se llevó a cabo la programación de la tarjeta de desarrollo utilizando el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Se eligió Arduino debido a su popularidad, facilidad de uso y flexibilidad para proyectos de electrónica. Además, su amplia comunidad de desarrolladores proporciona soporte técnico y una gran cantidad de recursos en línea, lo que facilita encontrar ejemplos y soluciones para la implementación de sensores. La programación se realizó utilizando el lenguaje de programación C/C++, que es el lenguaje nativo de Arduino. El código busca configurar y leer los datos de los sensores de partículas $PM_{2.5}$, temperatura y humedad relativa. Se deben emplear bibliotecas específicas para cada sensor, lo que simplifica la comunicación y la obtención de mediciones precisas.

Los sensores se conectan físicamente a la plataforma placa de desarrollo mediante cables o pines que permiten la transmisión de datos y energía eléctrica. Para cada

sensor, se identifican los pines de conexión requeridos (alimentación, tierra, datos) y se conectan a los pines correspondientes en la placa de desarrollo. Esto se realiza de acuerdo con las especificaciones y requisitos técnicos de cada sensor.

Además, para visualizar los datos en tiempo real y facilitar la interacción con el dispositivo, se implementó una interfaz utilizando una pantalla. El código se encargó de mostrar los valores medidos de manera clara y comprensible en la pantalla, lo que permitió a los usuarios conocer la calidad del aire en tiempo real.

Para almacenar los datos obtenidos, se utilizó un dispositivo de almacenamiento de datos, como una tarjeta de memoria SD. El código también incluyó rutinas para guardar los valores de las mediciones en un archivo de registro en la tarjeta de memoria, lo que dio la posibilidad de almacenar datos a lo largo del tiempo para su posterior análisis.

La programación en Arduino es accesible para personas con diferentes niveles de experiencia en programación y electrónica, lo que facilita la implementación y el desarrollo de este proyecto personalizado. La combinación de hardware y software permitió crear un sistema de medición de calidad del aire de bajo costo, ampliando la capacidad de monitoreo en el municipio de Puebla.

Para programación del código se utilizaron las siguientes bibliotecas:

SD.h: Esta biblioteca proporciona funciones para trabajar con tarjetas SD (Secure Digital) y tarjetas microSD. Permite acceder a los archivos en la tarjeta SD, abrir, cerrar, leer y escribir datos en ellos. También es útil para verificar la disponibilidad y el estado de la tarjeta SD.

SPI.h: Es una biblioteca que permite la comunicación mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface). Se utiliza para la comunicación entre el Arduino y otros dispositivos como sensores, pantallas o memorias, que utilizan el protocolo SPI para la transferencia de datos.

DS3231.h: Esta biblioteca se utiliza para interactuar con el módulo de reloj de tiempo real (RTC) DS3231. Permite obtener la fecha y hora actuales del RTC, así como configurar la fecha y hora en el RTC. También proporciona funciones para leer y configurar alarmas y generar interrupciones en el Arduino en función de la hora del RTC.

TinyGPS.h: Es una biblioteca para trabajar con módulos GPS. Permite obtener datos de posición (latitud y longitud), velocidad, altitud, número de satélites, entre otros, a partir de los datos de NMEA (National Marine Electronics Association) generados por el módulo GPS.

SoftwareSerial.h: Esta biblioteca permite la comunicación serial por software. Permite crear puertos serie virtuales utilizando pines digitales del Arduino que no sean los pines RX y TX predeterminados. Esto es útil cuando se necesita comunicarse con múltiples dispositivos que utilizan la comunicación serial y no hay suficientes pines hardware RX/TX disponibles.

Wire.h: Es una biblioteca para la comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit). Permite que el Arduino actúe como un maestro o esclavo en una red I2C y se comunique con otros dispositivos I2C, como sensores, pantallas LCD, módulos RTC, entre otros.

LiquidCrystal_I2C.h: Esta biblioteca se utiliza para trabajar con pantallas LCD que tienen un controlador I2C integrado. Facilita la conexión y el control de la pantalla LCD a través de la comunicación I2C en lugar de utilizar varios pines digitales.

SDS011-select-serial.h: Esta biblioteca se utiliza para interactuar con el sensor de partículas SDS011 utilizando la comunicación serial. Permite obtener datos de concentración de partículas PM_{2.5} y PM₁₀ del sensor SDS011.

Como se comentó en el apartado de implementación y construcción de dispositivo de medición, se usó una sola placa Arduino Uno para el dispositivo de medición estático (DE) y dos placas para construir los dispositivos de medición móviles (DM).

7.2.2 Diseño de las carcasas de los DM y DE.

El diseño del contenedor de sensores para los DM se enfocó en la portabilidad. Se utilizó fibropanel de densidad media (MDF por sus siglas en inglés) que es un material ligero. Se diseñó una estructura tipo rompecabezas, cuyas piezas se entrelazan. Las piezas se obtienen utilizando una cortadora láser CNC Router SR1325 que sigue fielmente planos de diseño generados en SolidWorks. El proceso resumido es el siguiente:

1. Diseño en SolidWorks: Se realiza el diseño de la carcasa empleando el software SolidWorks, que incorpora herramientas de modelado 3D para crear una representación virtual de la carcasa, definiendo sus dimensiones, formas y características específicas. Se agregaron los detalles necesarios, como orificios para los dispositivos y conexiones, ranuras y cualquier otro elemento requerido para el montaje de los componentes.

2. Exportación de plano: Una vez finalizado el diseño en SolidWorks, se procedió a la exportación de los planos. Esta etapa es fundamental para poder realizar el corte láser con precisión y garantizar que todas las piezas se ajusten correctamente. Los planos exportados incluyeron las vistas detalladas de todas las partes de la carcasa, así como las dimensiones y especificaciones técnicas necesarias para la fabricación.

3. Corte láser y fabricación: Con los planos en mano, se utilizó una máquina láser de corte para fabricar la carcasa a partir de láminas de madera. El proceso de corte láser permitió obtener formas y contornos precisos según el diseño de SolidWorks. La máquina láser siguió las instrucciones del archivo de corte generado a partir de los planos de SolidWorks, utilizando un láser para cortar y grabar las piezas de madera según las especificaciones.

Una vez cortadas las piezas, se lleva a cabo el ensamblaje de la carcasa. Se emplea la técnica de unión en cruz y tornillos para garantizar la solidez de la estructura y mantener los componentes en su lugar. El contenedor incluye varias aberturas: (1) para permitir el flujo de aire al interior del sensor de partículas $PM_{2.5}$, (2) se considera una abertura para que la antena del GPS pueda recibir señales de satélite y (3) una abertura donde se coloca la pantalla del display. Finalmente, se realizaron pruebas para verificar que la carcasa se ajustara correctamente a los dispositivos y cumpliera con los requisitos de diseño y funcionalidad establecidos en la etapa de diseño en SolidWorks. Este diseño es experimental, y requiere ser optimizado para poder tener un prototipo como elemento inicial de una posible comercialización del equipo más adelante. Sabemos que para la protección de dispositivos eléctricos que se

mantendrán a la intemperie, se deben cumplir normas y estándares de seguridad eléctrica. Una de las normas que se relaciona con la protección de dispositivos eléctricos es la norma IEC 60529, también conocida como la norma IP (Ingress Protection). Esta norma establece los grados de protección proporcionados por las envolventes de los equipos eléctricos contra la entrada de cuerpos sólidos y líquidos. Los grados de protección se indican mediante un código IP seguido de dos dígitos. El primer dígito indica el grado de protección contra cuerpos sólidos, mientras que el segundo dígito indica el grado de protección contra líquidos. Por ejemplo, un dispositivo con una clasificación IP67 está completamente protegido contra el polvo y puede soportar la inmersión en agua hasta una profundidad de un metro durante 30 minutos. Otra norma que se relaciona con la protección de dispositivos eléctricos es la norma UL 50, que establece los requisitos para las envolventes de equipos eléctricos no destinados a ser operados mientras se mojan (Ting Wu et al., 2015). Los grados de protección IP contra cuerpos sólidos son los siguientes: (0) No protegido, (1) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 50 mm de diámetro, (2) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 12 mm de diámetro, (3) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 2.5 mm de diámetro, (4) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 1 mm de diámetro, (5) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 0.5 mm de diámetro, (6) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 0.2 mm de diámetro, (7) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 0.1 mm de diámetro, (8) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 0.05 mm de diámetro y (9) protegido contra cuerpos sólidos de hasta 0.02 mm de diámetro.

Por otra parte, los grados de protección IP contra líquidos son: (0) No protegido, (1) protegido contra agua en gotas, (2) protegido contra agua en gotas y agua en chorros, (3) protegido contra agua en chorros y agua en chorros de alta presión, (4) protegido contra agua en chorros de alta presión y agua en chorros de alta presión y a presión, (5) protegido contra agua en chorros de alta presión y agua en chorros de alta presión y a presión, (6) protegido contra agua en chorros de alta presión y agua en chorros de alta presión y a presión, (7) protegido contra agua en chorros de alta presión y agua en chorros de alta presión y a presión, (8) protegido contra agua en chorros de alta presión y agua en chorros de alta presión y a presión, (9) protegido contra agua en chorros de alta presión y agua en chorros de alta presión y a presión.

Estos grados de protección son importantes para garantizar la seguridad de los dispositivos eléctricos en el diseño, la construcción y el uso de las máquinas y equipos. El ensamblaje del C₁ se instaló en una carcasa de la marca ZULKIT la caja de conexiones cuenta con dos o tres cierres de plástico para mayor seguridad y bloqueo. A prueba de humedad (IP65), protector solar, anticorrosión para mayor seguridad contra riesgos ambientales basados en la intemperie. Por otra parte, los dispositivos móviles (DM) albergan los circuitos 1 y 2 para realizar las mediciones georreferenciadas pedestres, el cual fue integrado en una carcasa de MDF.

7.3 Inter comparación de DM

Con el objetivo de evaluar reproducibilidad y probar la autonomía de los DM, se realizaron mediciones simultáneas de PM_{2.5} bajo condiciones estables con cuatro DM del 25 al 27 de mayo de 2023. Además del cálculo teórico de los consumos de

cada circuito, se realizaron pruebas en físico, donde cada uno de los DM fue conectado a una batería (6V, 4A) para evaluar el desempeño y la autonomía. Así mismo se investigó la correlación entre las mediciones de PM_{2.5} entre los DM empleando estadística estándar.

7.3.1 Consumo de energía de los dispositivos

Se registraron los valores de consumo de cada uno de los circuitos como se muestra en las tablas 5 y 6.

Tabla 5: Potencia total del C₁

Dispositivo	Voltaje (V)	Corriente Nominal (A)	Potencia (W)
SDS011	5	2.0×10^{-2}	1×10^{-1}
RTCDS3231	2.3 – 5	5.0×10^{-7}	2.5×10^{-6}
Micro SD	3.3-5	4.4×10^{-3}	2.2×10^{-2}
DHT11	5	1.5×10^{-3}	7.5×10^{-3}
LCD12C	3.3-5	2.8×10^{-2}	1.4×10^{-1}
Arduino UNO	6	4.6×10^{-2}	2.8×10^{-1}
Total		1.0×10^{-1}	5.5×10^{-1}

Tabla 6: Potencia total del C₂

Dispositivo	Voltaje (V)	Corriente Nominal (A)	Potencia (W)
Micro SD	3.3-5	4.4×10^{-3}	2.2×10^{-2}
RTCDS3231	2.3 – 5	5.0×10^{-7}	2.5×10^{-6}
LCD12C	3.3-5	2×10^{-2}	1.0×10^{-1}
GPS NEO 6	3.3-5	29×10^{-3}	1.5×10^{-1}
Arduino UNO	6	4.2×10^{-2}	2.5×10^{-1}
Total		9.54×10^{-2}	5.2×10^{-1}

La potencia de consumo o capacidad de la batería está determinada por el voltaje (6V) y la cantidad de amperes hora (4Ah). Su tiempo de descarga (t_d) de las baterías en horas, se calcula como el cociente de 4Ah entre el total de amperes consumidos (A_t) por cada circuito (C₁ y C₂)

$$t = \frac{4Ah}{A_t} \quad \text{ec.(1)}$$

7.4 Mediciones en el sitio de referencia

Estas mediciones tienen por objetivo generar los datos para la calibración de los dispositivos de medición. Se comparan las mediciones de $PM_{2.5}$ del sitio de referencia NIN y de los DE que fueron tomadas de forma horaria por dos meses, y con los datos generados se efectuó un análisis de regresión lineal múltiple para ajustar los valores de mediciones de concentraciones de $PM_{2.5}$ de los DE respecto a las mediciones del sitio de referencia. Para obtener las mediciones, se colocaron dos DE en la estación de monitoreo NIN justo debajo de la toma de muestras de aire de los sensores de referencia, para ello se solicitó acceso a las instalaciones del sitio NIN a las autoridades de la secretaría del medio ambiente de Puebla.

7.5 Mediciones Móviles Pedestres

Se llevaron a cabo mediciones móviles pedestres georreferenciadas en las calles y avenidas de la zona del centro histórico de Puebla empleando los DM calibrados. Las mediciones se realizaron en un horario diurno (11am) y vespertinos (3pm). Estos horarios fueron seleccionados debido a que se asocian a las horas pico de actividad en el centro histórico de Puebla, donde existe un mayor flujo vehicular y peatonal, ya que las personas ingresan a sus trabajos o están regresando a casa. Las mediciones se realizaron a lo largo de cuatro rutas específicas (R1, R2, R3 y R4), todas con inicio y finalización en el parque Ninfas, cada una de las rutas o recorridos se realizan en aproximadamente 45 minutos a pie. Las rutas se seleccionaron para incluir zonas típicas (residencial, comercial, turística, entre otras) y tomar en consideración factores como el flujo vehicular, la actividad comercial, la presencia de transporte público y la existencia de áreas

verdes. La Figura 9 muestra de manera esquemática la ubicación de las 4 rutas en el centro histórico de Puebla.

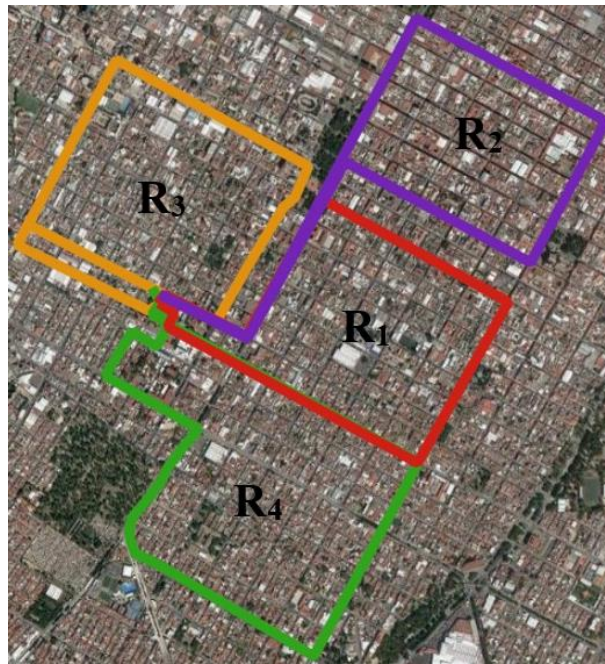


Figura 9. Recorrido alrededor del centro histórico de Puebla donde se realizaron mediciones georreferenciadas de $PM_{2.5}$, humedad y temperatura.

La R_1 recorrió la Avenida 23 Poniente, la calle 11 Sur, la Avenida 9 Poniente y la calle 16 de septiembre, para luego llegar a la intersección con la Avenida 25 Poniente y regresar al parque Ninfas. Esta ruta permitió obtener mediciones en áreas con tráfico vehicular significativo y presencia de actividad comercial. La R_2 siguió la Avenida 23 Poniente, la calle 11 Sur, la Avenida 5 Poniente y la calle 16 de septiembre, que luego se convierte en la calle 5 de mayo. Después continúa hasta la Avenida 10 Poniente y finalmente regresó a la intersección con la Avenida 23 Pte., para evaluar áreas con afluencia peatonal y presencia de negocios locales, lo que

podría influir en la calidad del aire. La R₃ comenzó en la Avenida 25 Pte. y recorrió la calle 23 Sur, la Avenida Juárez y la calle 13 Sur, para luego regresar a la Avenida 23 Pte. y volver al parque Ninfas. Con esta ruta, se obtuvieron mediciones en zonas cercanas a parques y espacios verdes. Finalmente, la R₄ partió de la Avenida 25 Pte. y se dirigió a la calle 16 de septiembre, continuando hacia la Avenida 43 Poniente, la calle 11 Sur y la Avenida 31 Pte., luego, tomó las calles Volcán de Colima y Avenida 27 Poniente, para finalmente llegar a la calle 15 Sur y regresar a la Avenida 25 Poniente y al parque Ninfas. Esta ruta permitió obtener mediciones en áreas con calles adoquinadas y diferentes tipos de tráfico vehicular.

Es importante mencionar que durante todos los recorridos se tomó evidencia fotográfica o en video de los recorridos, con la intención de más adelante correlacionar la existencia de incrementos súbitos en las concentraciones de PM_{2.5} con las fuentes generadoras de partículas. Los datos de georreferenciados del DM se procesan empleado código y bibliotecas en RStudio. Los datos son depurados y se generan (i) mapas de concentraciones en las rutas, (ii) gráficos de series de tiempo de las concentraciones y (iii) se realiza un análisis de frecuencia de los picos de concentraciones de PM_{2.5} por fuentes de emisión. Estos análisis proporcionan información valiosa para la toma de decisiones informadas; se pueden identificar áreas de mayor concentración de partículas en las avenidas, lo que permite focalizar esfuerzos en el control de la contaminación y en la implementación de políticas y acciones para mejorar la calidad del aire en zonas urbanas afectadas. El código empleado en RStudio para la realización de los cálculos está disponible a solicitud de los interesados.

8. Resultados

8.1 Conexiones de los sensores en las tarjetas de desarrollo con microprocesador ATmega328P

El DE que se utiliza para comparar con el sitio de referencia, está integrado por un único “circuito 1” el cuál se presenta en Figura 10^a donde se muestra un esquema de las conexiones entre los sensores (MicroSD, DHT11, RTC DS3231, SDS011 y LCD) y la placa de desarrollo (Arduino UNO). Los detalles de las conexiones se muestran en la Tabla 7.

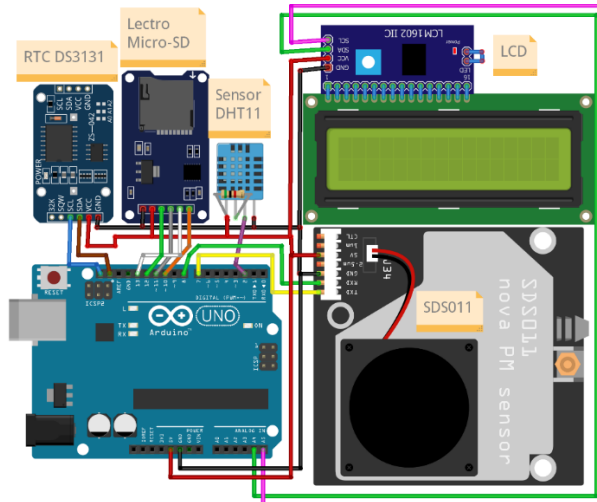


Figura 10a. Esquema de conexiones del circuito 1.

Tabla 7. Conexiones entre sensores y la tarjeta Arduino UNO en el C₁

Micro SD	Arduino	LCD	Arduino	SDS011	Arduino
CS	~10	SDA	A4	TXD	7
~11	MOSI	SCL	A5	RXD	8
12	MISO	GND	GND	GND	GND
13	SCK	VCC	5V	VCC	5V

<i>GND</i>	<i>GND</i>
<i>VCC</i>	<i>5V</i>

DHT11	Arduino	RTC DS323	Arduino
DATA	2	SDL	SDL
GND	GND	SCI	SCL
VCC*	5V	GND	GND
		VCC	5V

* Se utilizó una resistencia entre VCC y el pin DATA para mantenerlo siempre en un estado alto

Por otra parte, los DM que son utilizados para realizar las mediciones a pie están conformados por el “circuito 1”, y también por el “circuito 2” ya que este último permite incorporar el módulo GPS que brinda datos de las coordenadas que deben ser desplegadas en tiempo real a través de una pantalla (display) y almacenadas en una Micro SD junto con la fecha de registro. La fecha de registro de datos esta sincronizada con la fecha de registro de datos del circuito 1 y permite unir las bases de datos de ambos circuitos. En la Figura 10b se muestra un esquema de las conexiones del circuito 2 y los detalles sobre las conexiones entre los sensores y la placa de desarrollo se muestran en la Tabla 8.

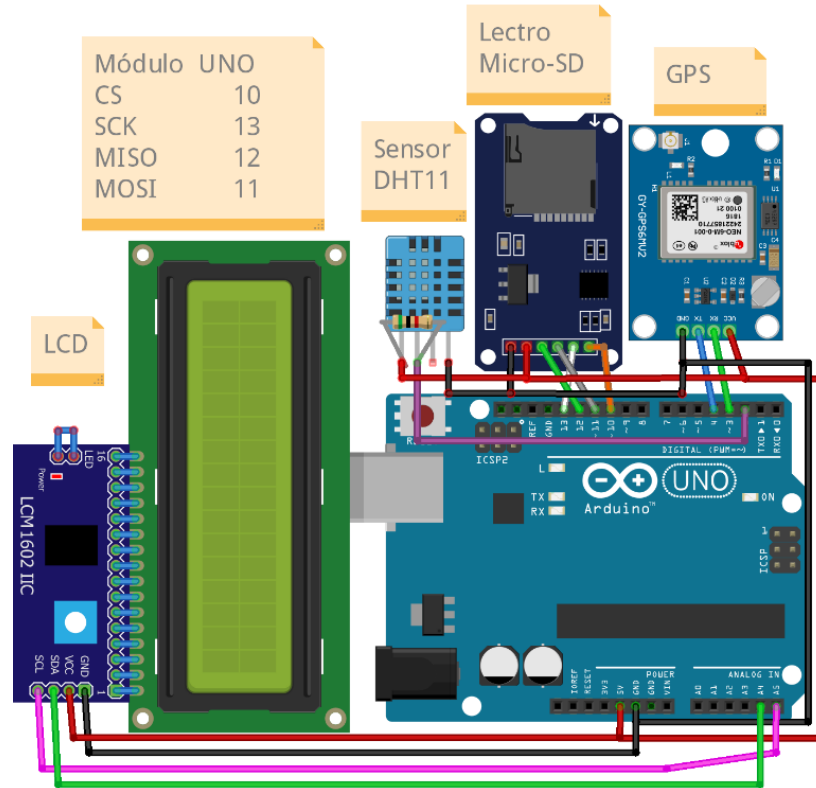


Figura 10b. Esquema de conexiones del circuito 2.

Tabla 8. Conexiones (Circuito 2) entre sensores y la tarjeta Arduino UNO

Micro SD	Arduino	GPS	Arduino	LCD	Arduino
CS	~10	RX	~3	SDA	A4
~11	MOSI	TX	4	SCL	A5
12	MISO	GND	GND	GND	GND
13	SCK	VCC	5V	VCC	5V
GND	GND				
VCC	5V				

8.2 Construcción de las carcadas

La figura 11 muestra la carcasa de MDF (Medium Density Fiberboard) que alberga los circuitos que conforman los DM.

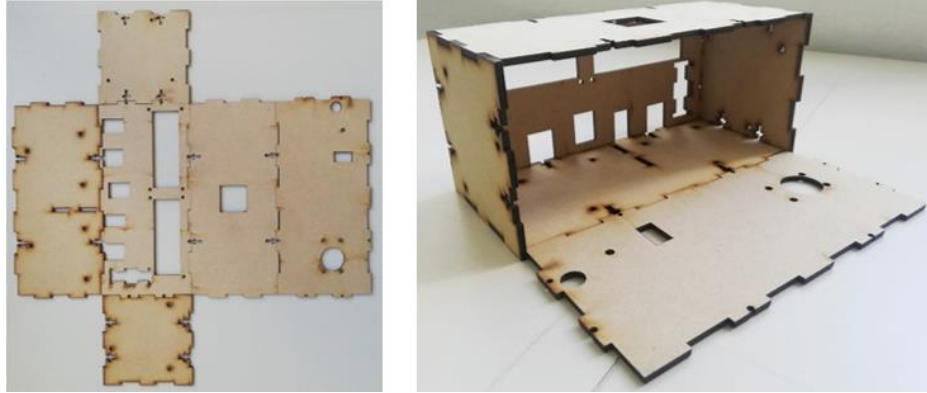


Figura 11. Carcasa de fibropanel (MDF) para albergar los circuitos C1 y C2 del DM.

Finalmente, en la Figura 12 se muestran el (a) DE y (b) DM equipados con los sensores correspondientes

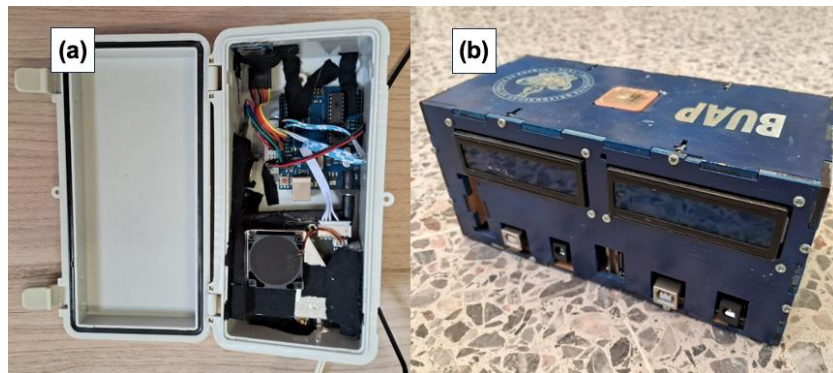


Figura 12. Imagen de (a) Dispositivo estáticos (DE) para mediciones en sitio de referencia y (b) Dispositivos Móviles (DM) para mediciones a pie.

8.3 Reproducibilidad e Inter comparación de mediciones con los DM

La Figura 13 muestra la colocación de cuatro DM alimentados por baterías, para realizar mediciones de PM_{2.5} de manera simultánea.



Figura 13. Mediciones simultáneas de PM_{2.5} empleando los DM colocados en un ambiente estable dentro del edificio FCQ5 de la BUAP.

La variación temporal de las concentraciones de PM_{2.5} (μgm^{-3}) obtenidas con los cuatro DM se muestran en la Figura 14 y permiten observar que estos operan de manera muy similar; responden con la misma exactitud a cambios súbitos en las concentraciones de PM_{2.5}. Las mediciones son prácticamente iguales si se considera la incertidumbre ($\pm 15\%$) que proporciona el fabricante.

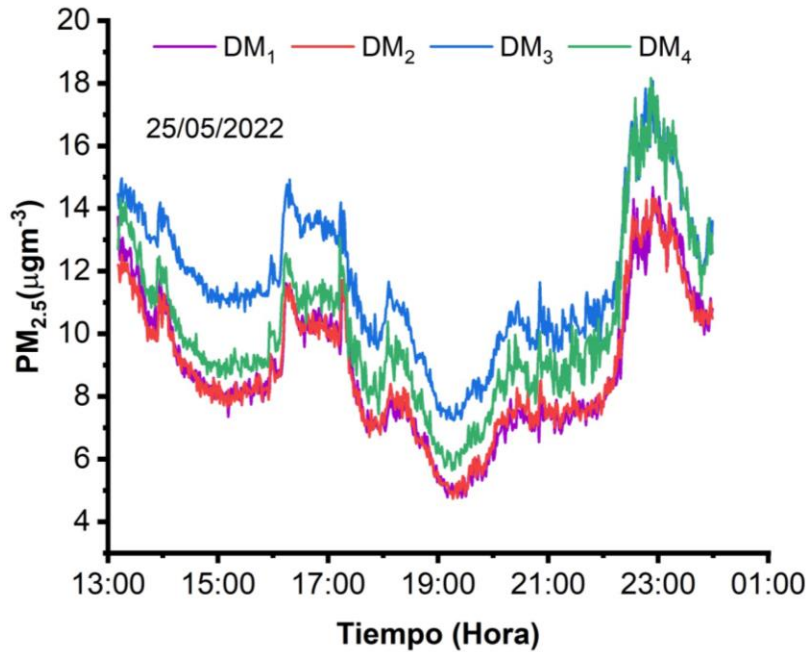


Figura 14. Series de tiempo de las concentraciones de PM_{2.5} empleando los DM₁, DM₂, DM₃ y DM₄

La Figura 15 muestra la correlación entre las mediciones de los DM. La relación mostrada en la Figura 15(a) entre el DM₁ y DM₂ es coincidente, de hecho, presenta una correlación cercana a la unidad (0.96). Las gráficas 15(a)-(e) muestran que la relación está por arriba del comportamiento 1:1, mientras que la relación entre DM₃ y DM₄ muestra el comportamiento opuesto. En algunos casos, el ajuste lineal nos revela que a medida que las concentraciones de partículas aumentan las diferencias entre las mediciones de los sensores, tal es el caso de las Figuras 15(c) y 15(e). Pero esto no es definitivo ya que las Figuras 15(a), 15(b) y 15(d) muestran ajustes prácticamente paralelos al comportamiento 1:1. Por último, de acuerdo con las pruebas de rendimiento, se determinó que estas permiten un funcionamiento adecuado de los DM menor a 4 horas, lo cual es suficiente y garantiza que podemos realizar las mediciones móviles a pie que duran menos de una hora.

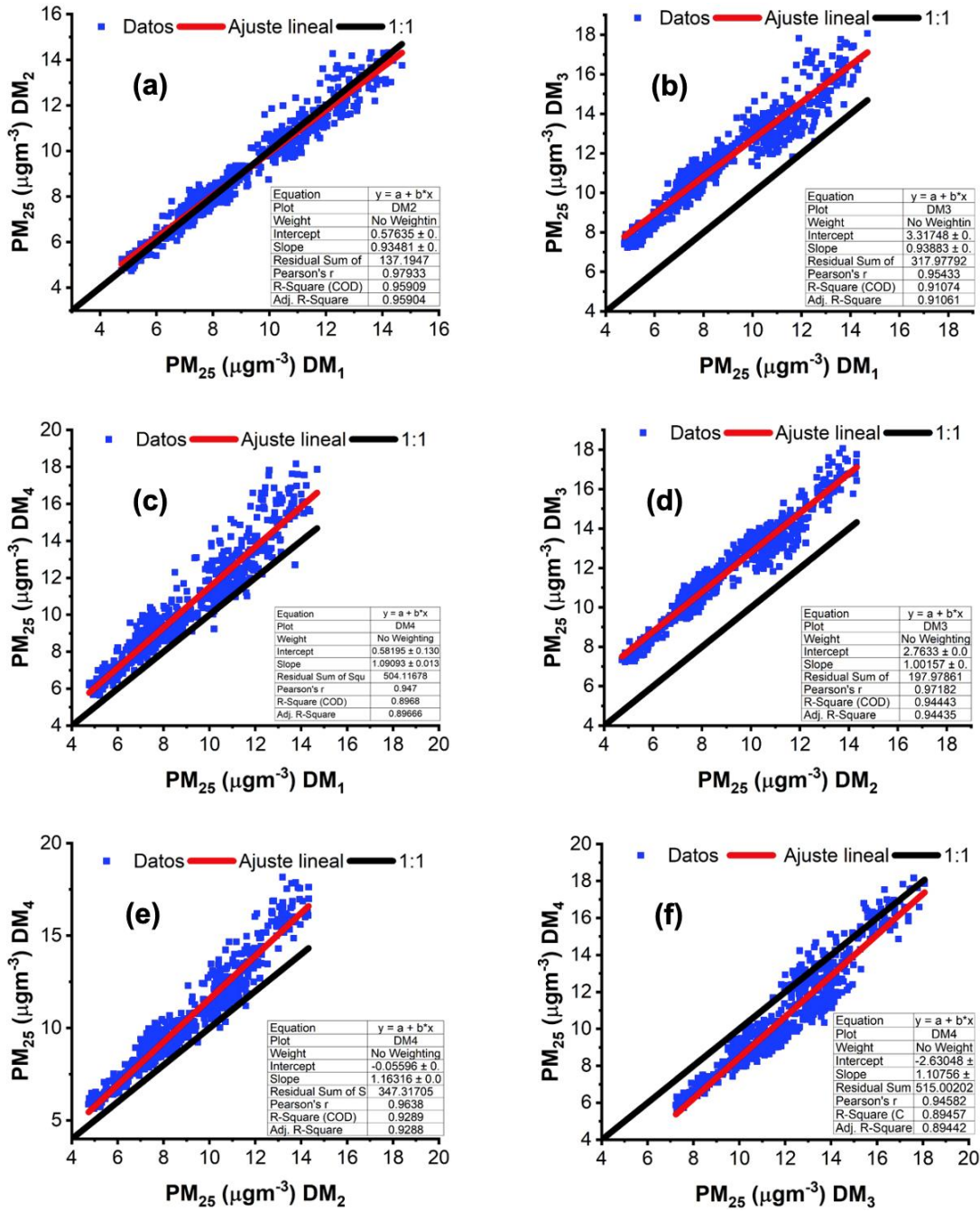


Figura 15. Correlación entre dispositivos móviles (DM). La línea negra representa una relación 1:1, y la línea roja el ajuste lineal de la correlación entre los dispositivos de medición.

8.3.1 Tiempo de autonomía de las baterías

Como se mencionó en la sección 7.3.1 para obtener el tiempo de descarga de la batería que se usará se debe sustituir los valores en la ec. (1) para el circuito 1 (C_1) y circuito 2 (C_2) de la siguiente forma:

$$td_{c1} = \frac{4Ah}{0.1 A} = 40 h$$

$$td_{c2} = \frac{4Ah}{0.0954 A} = 42 h$$

Dando como resultado que la batería en el circuito 1 tiene una duración de 40 h (que es el dispositivo estático DE más una pantalla LCD) y para el circuito 2 una duración de 42 h (que al ser sumado con el DE más una pantalla LCD conforman al dispositivo móvil DM). Cabe aclarar que estos cálculos son con el uso de baterías independientes para cada circuito por lo que se puede optar por usar una batería para todo el DM lo cual permitiría un tiempo de descarga aproximado de 20.5 h. Sin embargo, durante las mediciones del tiempo de descarga real, la duración puede ser ligeramente menor debido a distintos factores, además, el sistema en estado de reposo tiene un consumo de 50mA. Con todo lo antes dicho se asegura que no hay problema para el monitoreo usando el DM, debido a que el tiempo para realizar los recorridos en un día es menor de 4 horas.

8.4 Mediciones en el sitio de referencia

Las Figuras 16(a)-(b) muestran la colocación de los DE justo debajo de la entrada de aire del monitor de referencia del sitio de monitoreo NIN. En la Figura 16(c) se muestra el interior del DE equipado con el SBC de $PM_{2.5}$, el módulo de almacenamiento, y los sensores de temperatura y humedad.

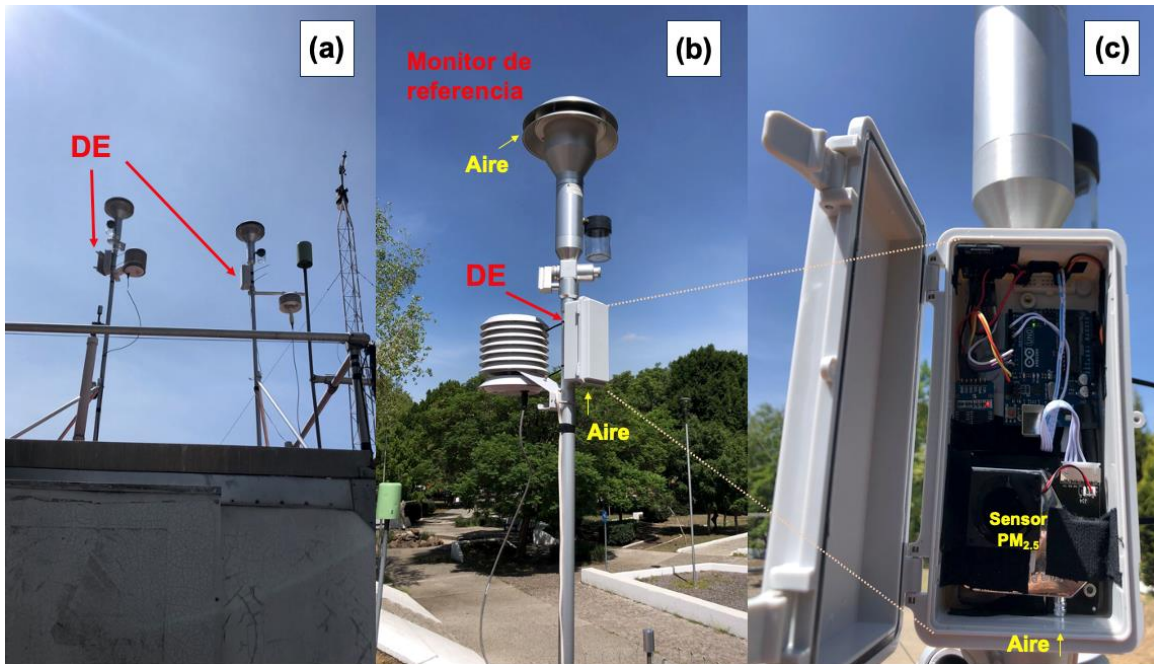
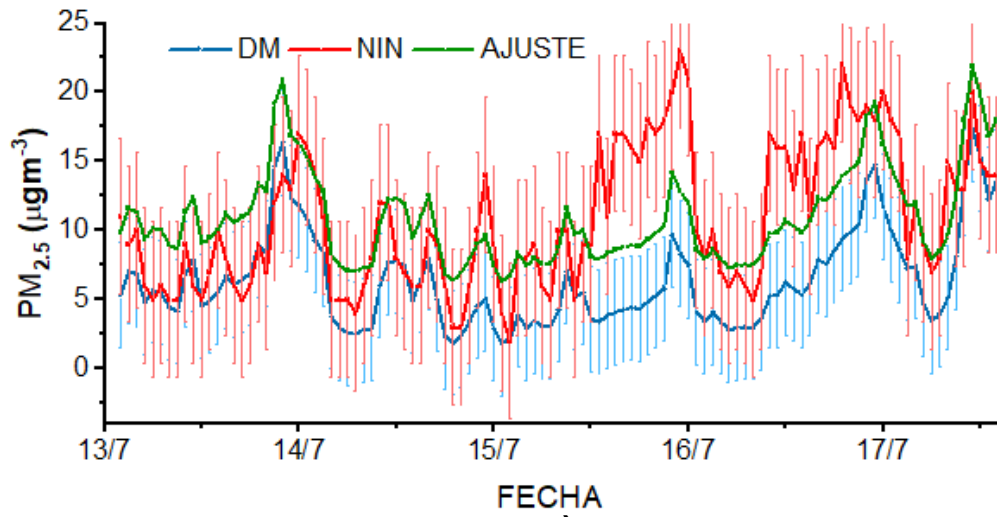
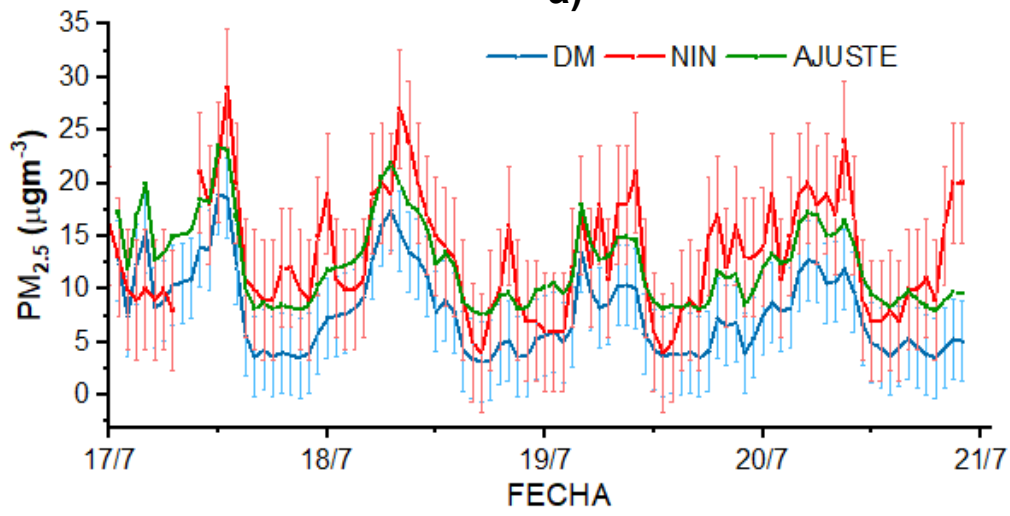


Figura 16. Dispositivo estático (DE) colocados junto a los instrumentos de referencia en el sitio Ninfas.

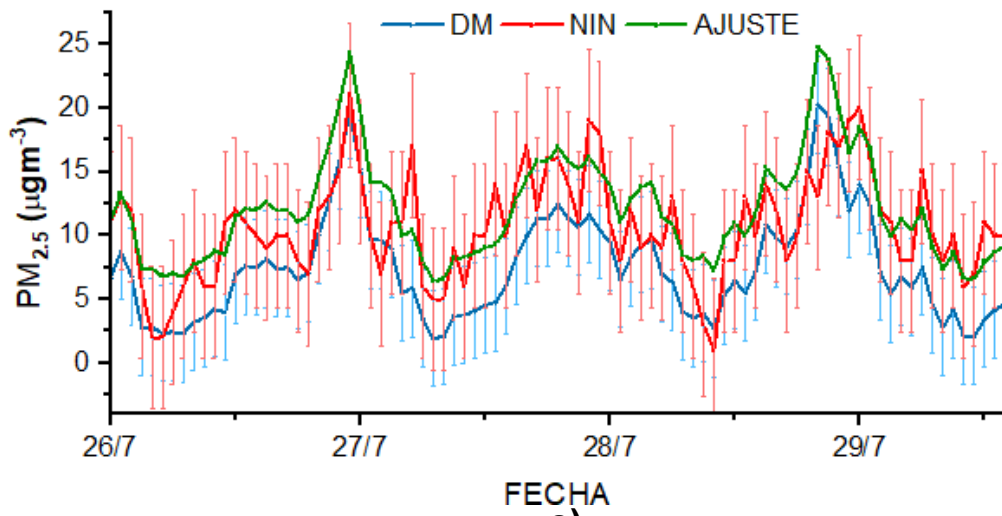
Con los datos de $PM_{2.5}$ de los DE y NIN (referencia) se realiza un análisis de regresión lineal múltiple para ajustar los datos del SBC de partículas montado en el DE acuerdo con los datos del sitio de referencia. En la Figura 17 se muestra las series de tiempo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ del (a) 13 al 17 de julio, (b) 17 al 21 de julio, (c) del 26 al 29 de julio y del (b) 29 julio al 2 de agosto, de 2022.



a)



b)



c)

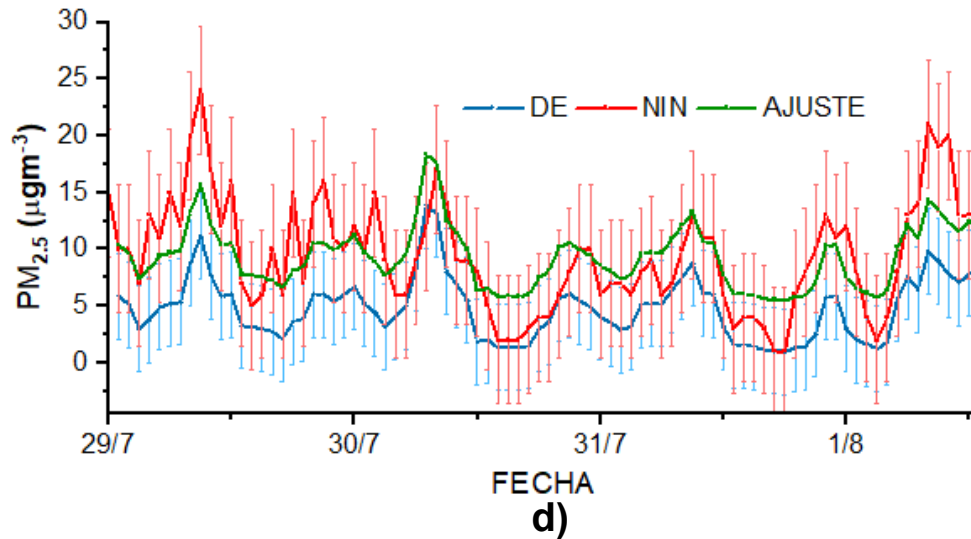


Figura 17. Series de tiempo de concentraciones de PM_{2.5} con los dispositivos estáticos (DE) y los datos de referencia correspondientes del sitio NIN. La línea verde representa el ajuste de las concentraciones de PM_{2.5} después de calibrar con regresión lineal múltiple para dos periodos (a) 13 al 17 de julio, (b) 17 julio al 21 julio, (c) del 26 al 29 de julio y (d) del 29 de julio al 2 de agosto, del 2022.

Los parámetros obtenidos con el modelo de regresión lineal múltiple alimentados por las mediciones de PM_{2.5}, temperatura y humedad, a partir del DE, permiten calibrar las mediciones. Estos parámetros son usados en las mediciones a pie con los DM para mejorar la confianza de las mediciones. En la siguiente sección mostramos los resultados de las mediciones móviles hechas con los DM-calibrados.

8.5 Mediciones móviles

En las figuras 18 a 29 se muestran mapas de la distribución espacial de las mediciones y su correlación con las series de tiempo de concentraciones de $PM_{2.5}$ para distintas fechas y rutas.

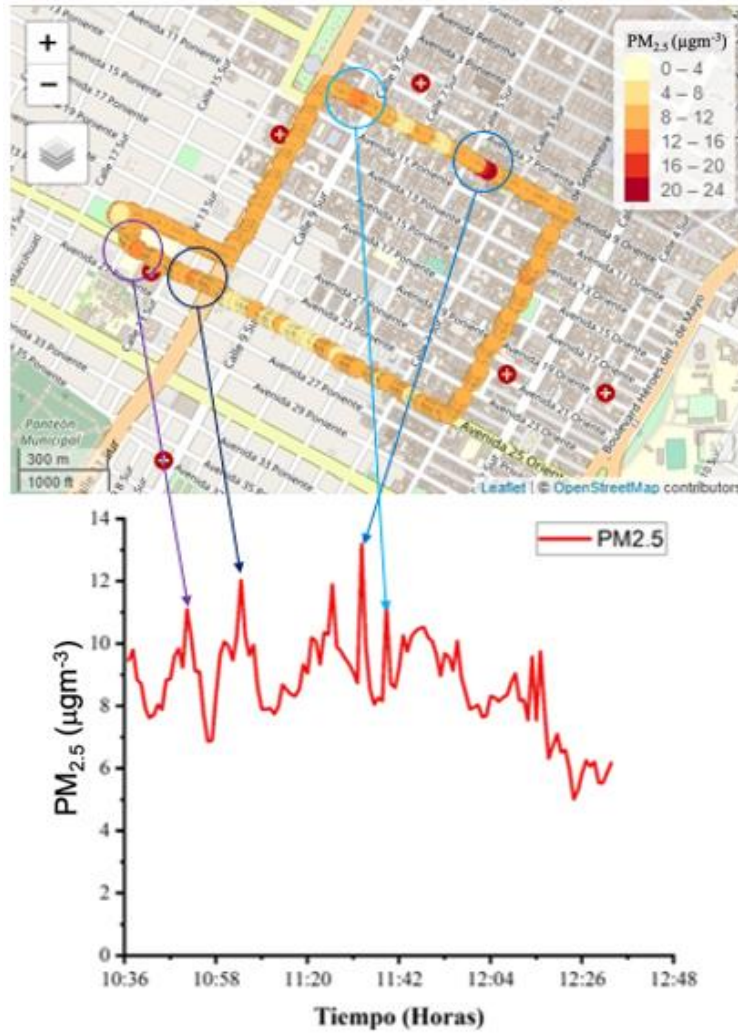


Figura 18. Mapa de calor y variación temporal (matutina) de concentraciones de $PM_{2.5}$ durante la ruta **R₁** el día 14 de julio de 2022.

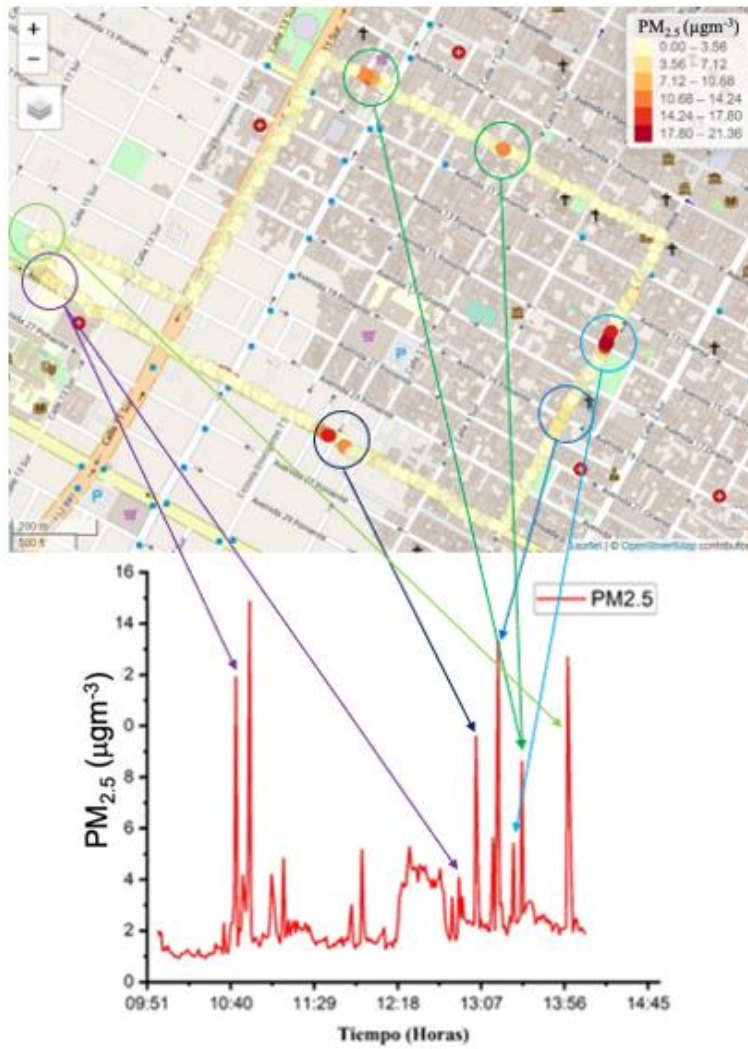


Figura 19. Mapa de calor y variación temporal (matutina) de concentraciones de $PM_{2.5}$ durante la ruta R_1 el día 15 de julio de 2022.

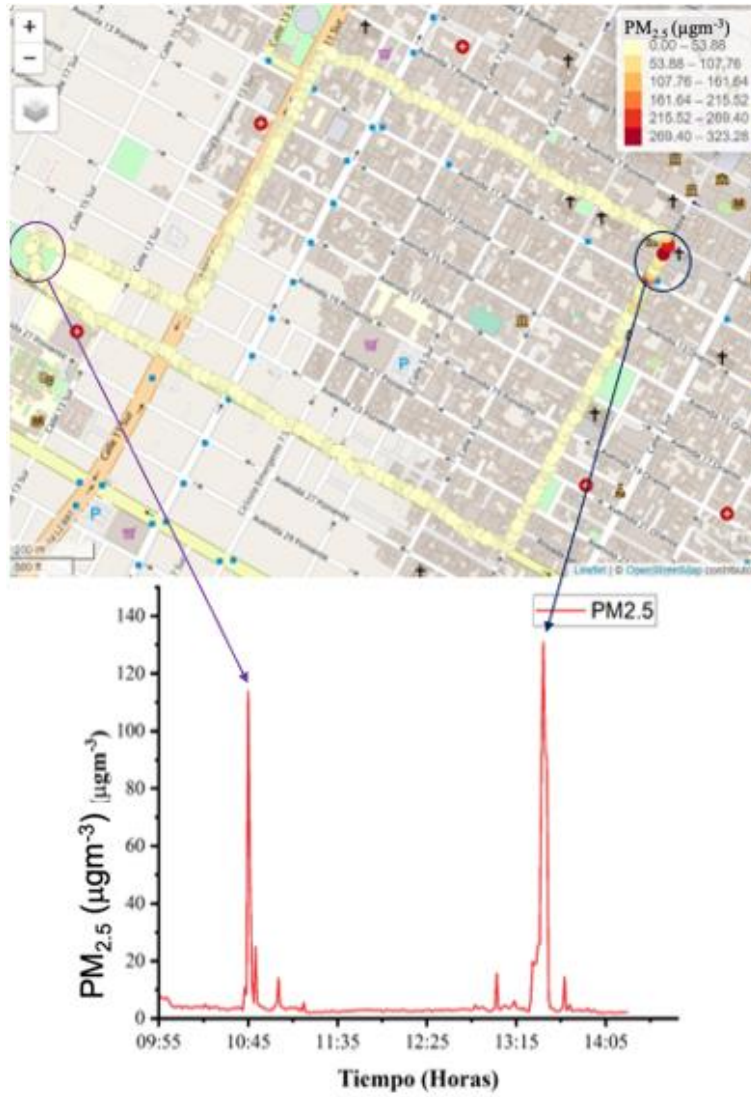


Figura 20. Mapa de calor y variación temporal (matutina) de concentraciones de PM_{2.5} durante la ruta **R₁** el día 16 de julio de 2022.

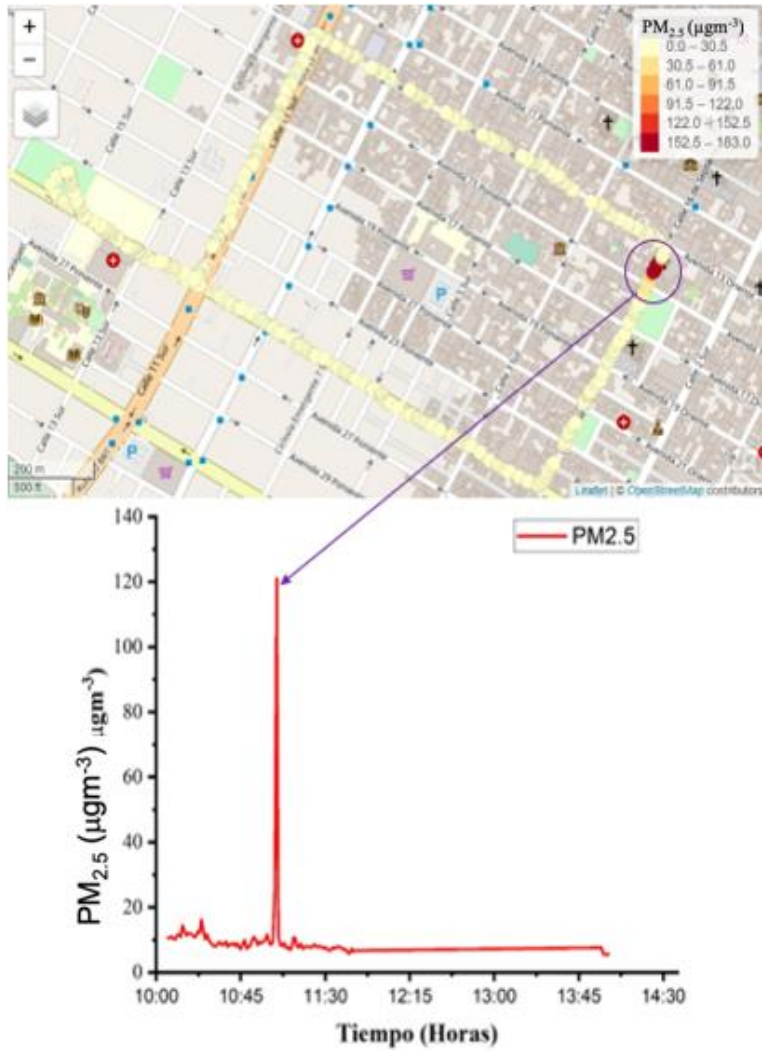


Figura 21. Mapa de calor y variación temporal (matutina) de concentraciones de PM_{2.5} durante la ruta **R₁** el día 17 de julio de 2022.

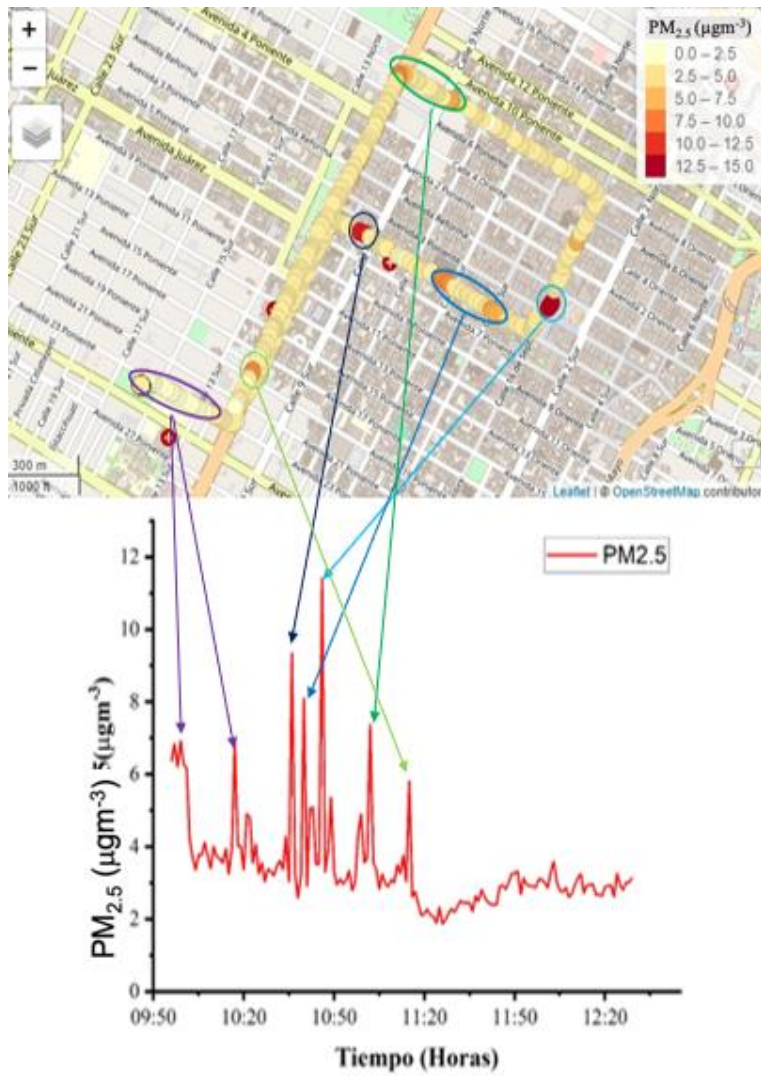


Figura 22. Mapa de calor y variación temporal (matutina) de concentraciones de PM_{2.5} durante la ruta **R₂** el día 16 de julio de 2022.

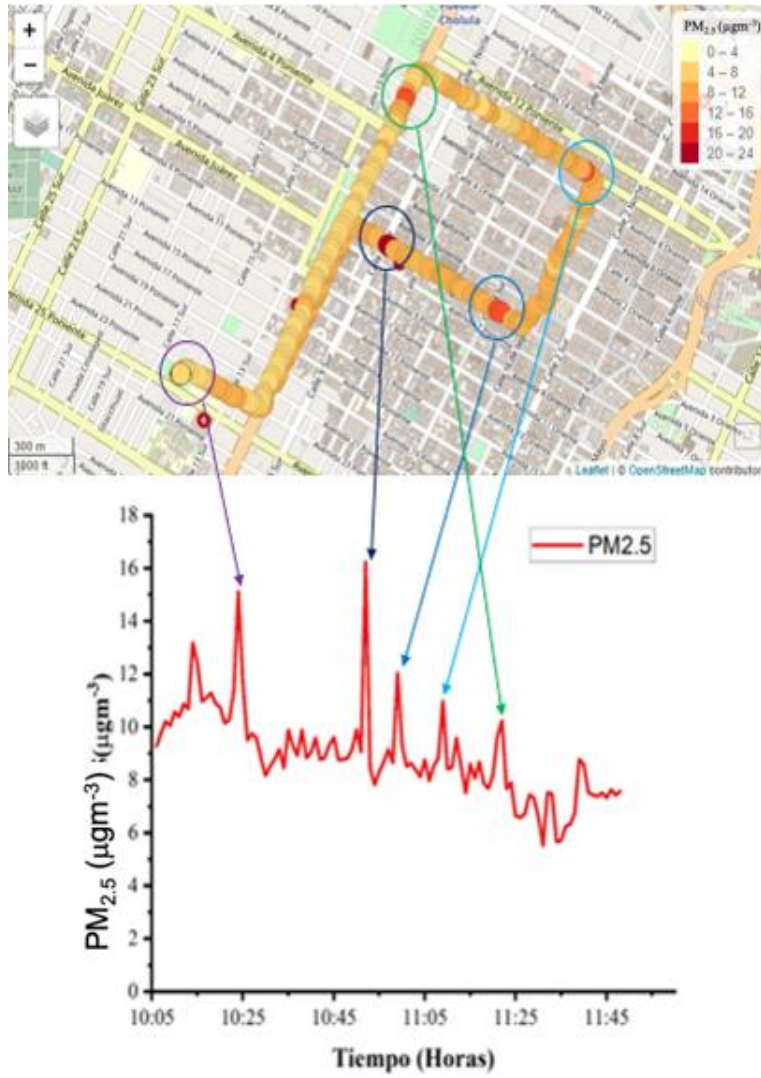


Figura 23. Mapa de calor y variación temporal (matutina) de concentraciones de PM_{2.5} durante la ruta **R₂** el día 17 de julio de 2022.

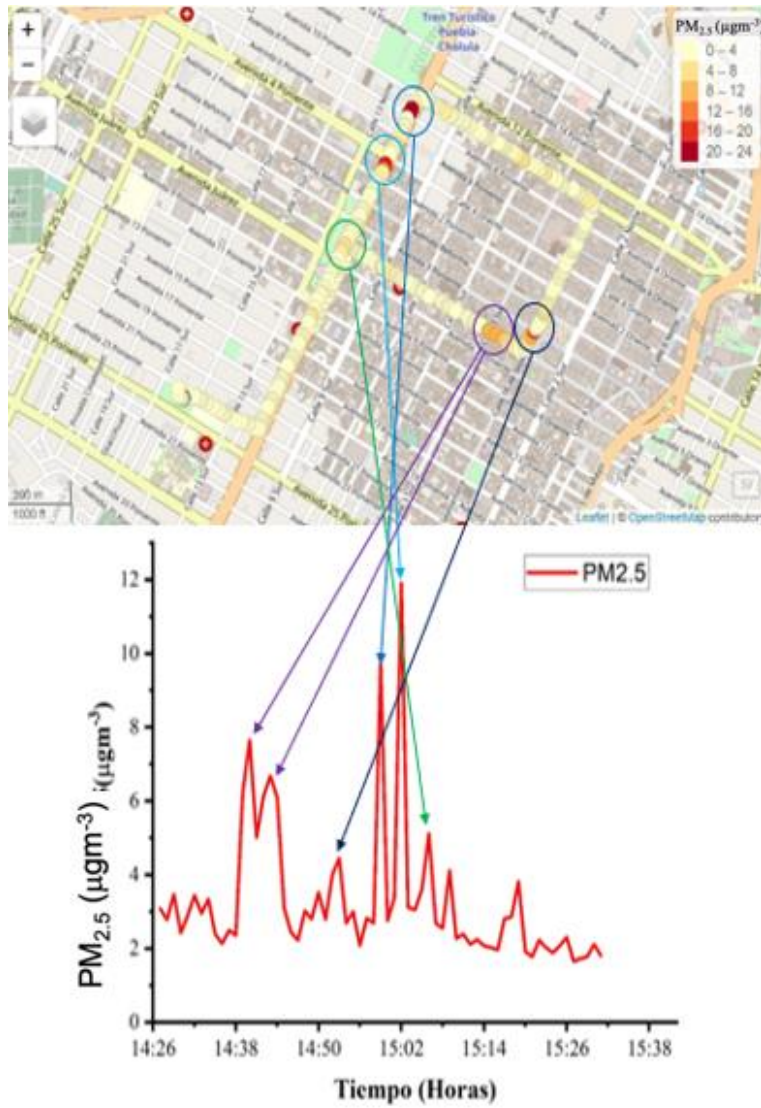


Figura 24. Mapa de calor y variación temporal (vespertina) de concentraciones de $PM_{2.5}$ durante la ruta R_2 el día 14 de julio de 2022.

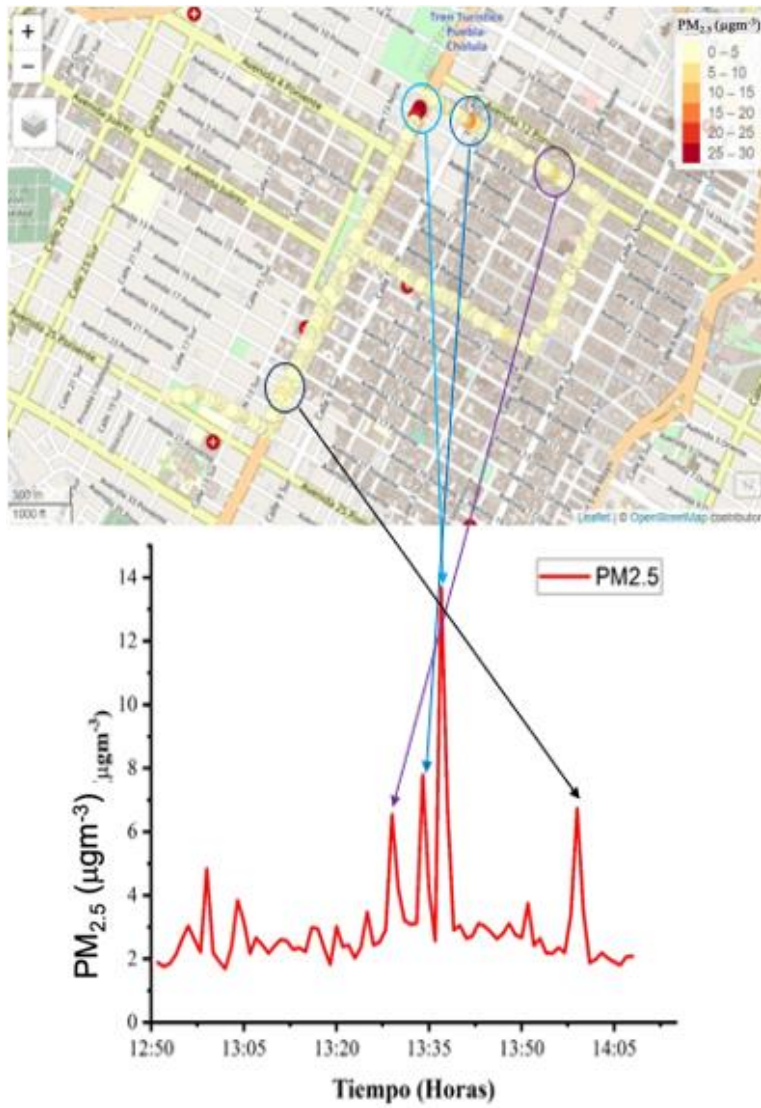


Figura 25. Mapa de calor y variación temporal (vespertina) de concentraciones de PM_{2.5} durante la ruta R₂ el día 15 de julio de 2022.

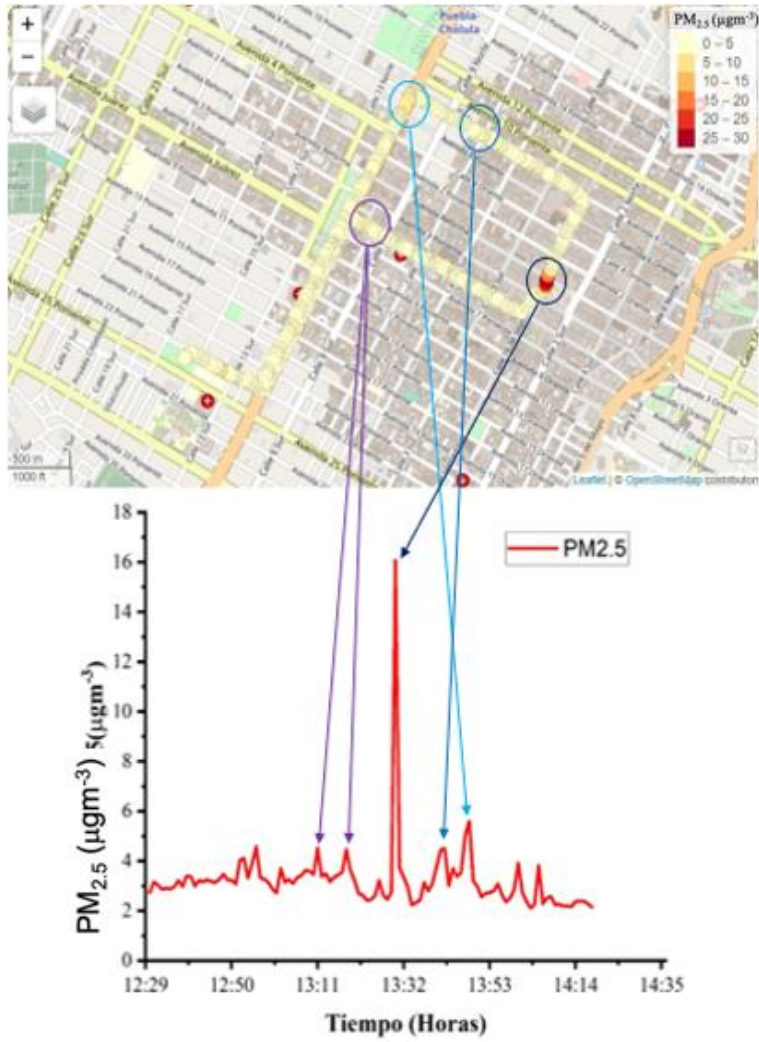


Figura 26. Mapa de calor y variación temporal de concentraciones de $PM_{2.5}$ en el recorrido R_1 del 16 de julio (vespertino) de julio de 2022

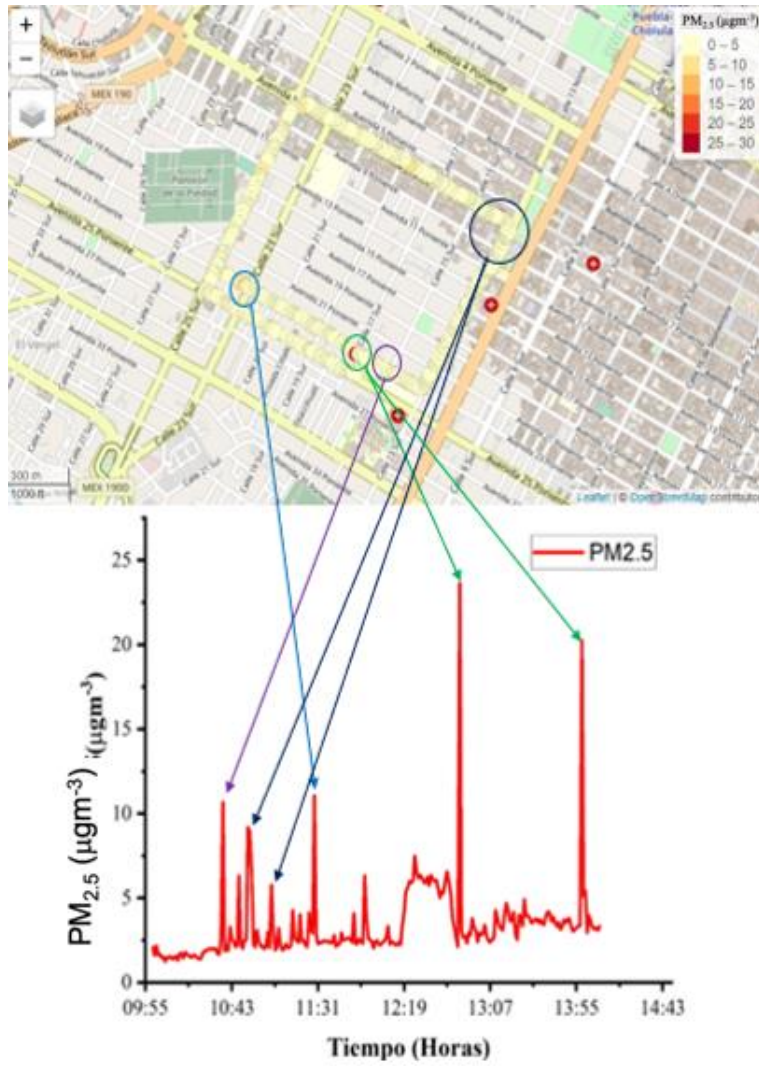


Figura 27. Mapa de calor y variación temporal de concentraciones de $PM_{2.5}$ en el recorrido R_3 del 15 de julio (matutino), de 2022

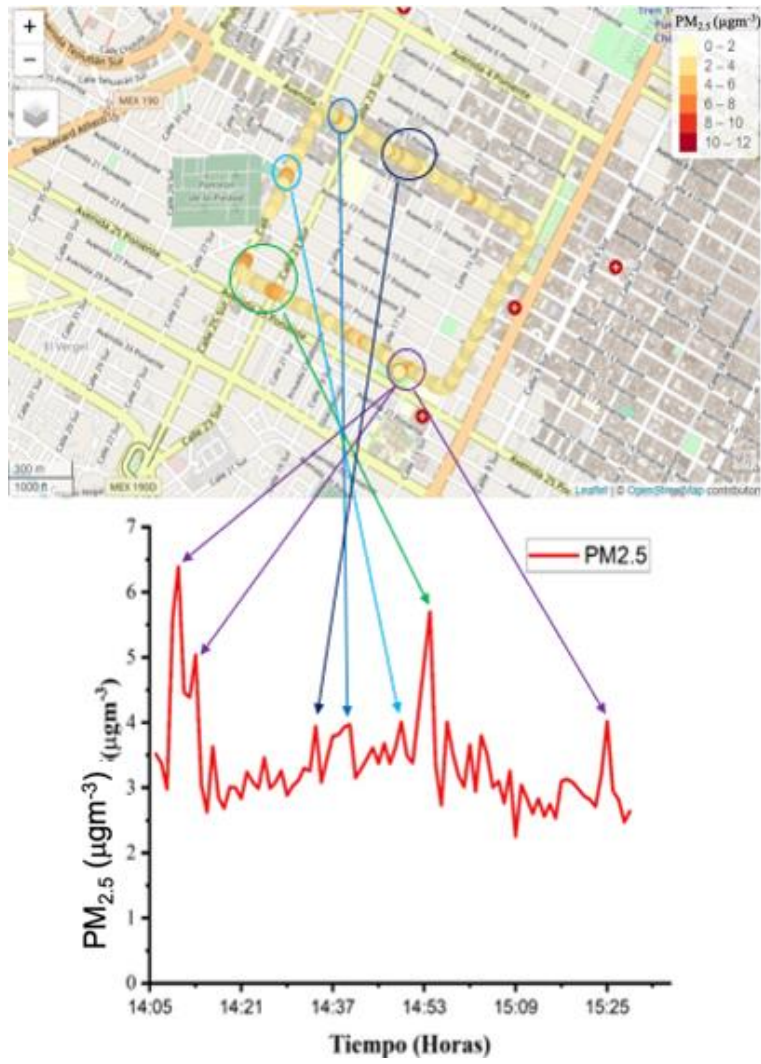


Figura 28. Mapa de calor y variación temporal de concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ del día 14 de julio (vespertino) de 2022 en la ruta **R₃**

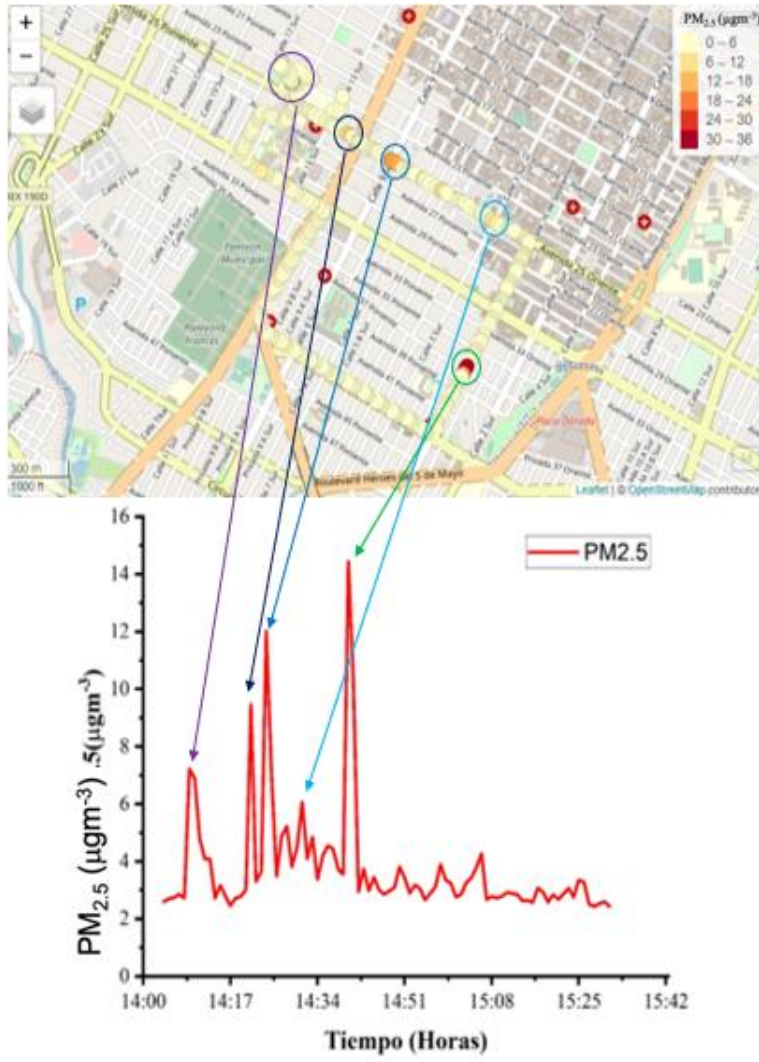


Figura 29. Mapa de calor y variación temporal de concentraciones de PM_{2.5} del día 14 de julio (vespertino) de 2022 en la ruta R₄.

Mediante el uso de las fotos y videos realizadas durante te el recorrido, se pudieron detectar las posibles principales fuentes de material particulado, específicamente de partículas de PM_{2.5}, junto con la comparación de los mapas en lo que se muestra los puntos caliente y con las gráficas de las mediciones, tomando principalmente los picos más altos del recorrido, estos puntos fueron sumados y se les asigno una posible fuente de manera cualitativa, como se observa en la tabla 9.

Tabla 9. Frecuencia de ocurrencia de fuentes de PM_{2.5} asociadas ubicaciones donde se observaron incrementos recurrentes de las mediciones de partículas.

Ruta	Fuentes				
	Vehículos	Naturales	Cruces viales	Resuspensión	Quema de Biomasa
1	838	337	183	526	19
2	1027	303	211	317	35
3	851	382	191	482	0
4	956	238	269	338	0
Total	3672	1260	854	1663	54

Los vehículos motorizados, se presentan como el mayor problema en cuanto a las emisiones cercanas a los peatones. Identificamos, que en los cruces peatonales ocurren dos casos: (i) Cuando los peatones esperan en cruces de avenidas, los autos que también se acumulan durante la espera del cambio de luz en el semáforo y están muy cerca (< 2m) de los peatones. Los vehículos a Diesel son en este caso los principales causantes de emisiones de material particulado. (ii) En el segundo caso, los peatones esperan en cruces de avenidas, pero ahora los autos circulan a

velocidades bajas en calles en mal estado o adoquinadas y generan emisiones de $PM_{2.5}$ pero además resuspensión del polvo del suelo.

En cuanto a la quema de biomasa, las mediciones fueron mínimas y se asociaron con negocios como rosciterías o lugares que utilizan leña como combustible. Estas fuentes fueron escasas y se encontraron cerca del zócalo. La figura 30 presenta la proporción de fuentes asociadas a los incrementos de $PM_{2.5}$ observados durante los recorridos. Finalmente, otras fuentes notables de partículas fueron las se encontraban principalmente cerca de zonas verdes como parques (naturales). Estas áreas abiertas permiten un mayor flujo de viento y actúan como captadores de polvo, polen y otras partículas, contribuyendo a las mediciones.

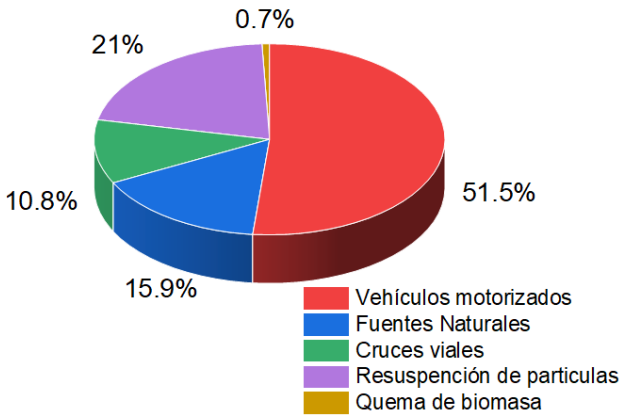


Figura 30. Porcentaje de frecuencia por tipo de fuentes de emisión de $PM_{2.5}$

9. Conclusiones

En este trabajo se comprobó que es posible emplear SBC para la construcción de dispositivos calibrados que permitan (i) medir la exposición al peatón a $PM_{2.5}$ y (ii) la determinación de sitios con altas concentraciones de partículas durante sus recorridos, de igual manera (iii) la identificación de las fuentes más frecuentes y asociadas a incrementos de $PM_{2.5}$ en la zona centro de la ciudad de Puebla.

Se mostró el desarrollo de dos circuitos, los cuales al implementarlos de manera simultánea dan lugar al dispositivo móvil (DM), en cuanto al dispositivo estático (DE) se obtiene de la modificación del circuito 1 esta modificación consiste en retirar la pantalla LCD. Estos dos circuitos fueron equipados con sensores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , sensores de temperatura (T), humedad relativa (HR), geolocalización (GPS), timers (reloj), módulos de almacenamiento (MicroSD) y pantallas que permitieron la visualización en tiempo real de datos, dichos dispositivos fueron programados y configurados en lenguaje C++/C en una placa de desarrollo con microcontrolador con un microcontrolador ATmega328P, el Uno opera a 16 MHz y cuenta con 32 KB de memoria Flash, 2 KB de RAM y 1 KB de EEPROM. Equipado con 14 pines digitales, 6 pines analógicos y puertos para comunicación serial y USB. Los componentes que conformaron al DM fueron protegidos y trasladados en una carcasa hecha por fibropanel de densidad media o MDF, sin embargo, para la protección del dispositivo estático se requirió una carcasa que cumpliera con la norma IP65, esta norma permite tener impermeabilidad y garantizar el correcto y continuo funcionamiento de los componentes electrónicos al impedir daños por

movimientos bruscos, o filtración de líquidos que puedan dañar los componentes eléctricos.

Las pruebas de Inter comparación mostraron una correlación promedio entre todos los dispositivos construidos de 0.93 para la R de Pearson, esto quiso decir que existe similitud en su comportamiento durante las mediciones de concentraciones de PM_{2.5}. Se resalta que el desfase existente en las mediciones tomadas por cada uno de los dispositivos fue justificado por su margen de error, siendo este del $\pm 15\%$. En esta prueba incluso se determinó que el consumo del circuito 1 fue de 1.0×10^{-1} A y para el circuito 2 de 9.54×10^{-2} A, permitiendo que las baterías (por circuito) sean usadas para proporcionar una Autonomía de 40 horas o de 20 horas usando solo una batería para ambos circuitos.

La calibración obtenida mediante el modelo de regresión lineal múltiple concedió un ajuste del 52% para los valores registrados por los dispositivos de medición con respecto a los valores rescatados de la estación de monitoreo del parque ninfas (sitio de referencia NIN), si bien es una incertidumbre considerable, esta se encuentra en el rango de los sensores de bajo costo comerciales, siendo este rango de incertidumbre del 50 al 70%. Es oportuno mencionar, que el dispositivo funcionara de manera semejante en ambientes que no excedan el 90% de humedad, además, la calibración debe ser propia para cada condición ambiental.

Para futuros estudios se recomienda efectuar entrenamiento para los sensores, este entrenamiento consiste en tomar mediciones en un periodo mínimo de 3 meses en distintos sitios al mismo tiempo, esto dará un mejor nivel de confianza en las mediciones con los sensores de bajo costo.

Con los datos obtenidos gracias a los recorridos hechos al rededor del centro histórico de Puebla se concluye que la principal fuente asociada a incrementos súbitos en las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron ocasionadas por los vehículos motorizados (57%), seguidas por la resuspensión de partículas (21%), fuentes naturales (15.9%), cruces viales (10.8%) y por la quema de biomasa (0.7%).

Los cruces de calles y avenidas, las primeras compuestas por adoquines y las segundas por pavimento uniforme, fueron sitios con incrementos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ de manera recurrente, principalmente los cruces entre calles, adicional a esto en las vialidades angostas o estrechas hubo mayores concentraciones de $PM_{2.5}$. En este contexto se recomienda que las rutas de transporte público (combis) eviten circular por vías no pavimentadas o evitar el uso de adoquines para construcción de vialidades.

Algo más a subrayar, es que en diversas calles y avenidas mientras se espera el cambio de luz en el semáforo, las personas de todas las edades se aglomeran y están expuestas a las emisiones de los vehículos motorizados. En otras palabras, es recomendable que las personas estén al menos a 1.5 m alejadas de los vehículos para reducir los niveles de exposición. En próximos estudios sería adecuado medir de manera continua, al menos a dos alturas diferentes las concentraciones de $PM_{2.5}$ en cruces peatonales para determinar la exposición personal independientemente de la edad.

10. Referencias

- Adhiwibowo, W., Daru, A. F., & Hirzan, A. M. (2020). Temperature and Humidity Monitoring Using DHT22 Sensor and Cayenne API. *Jurnal Transformatika*, 17(2), 209. <https://doi.org/10.26623/TRANSFORMATIKA.V17I2.1820>
- Akinwole, O. O., & Oladimeji, T. T. (2018). Design and Implementation of Arduino Microcontroller Based Automatic Lighting Control with I2C LCD Display. *J Electr Electron Syst*, 7, 258. <https://doi.org/10.4172/2332-0796.1000258>
- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient PM2.5 monitoring. *Journal of Sensors*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5096540>
- Caro, S. D., Montero, E. Y. A., Consuegra, A. D. S. A., & Montero, A. S. (2021). EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN SENSOR DE BAJO COSTO PARA MEDIR LA CALIDAD DEL AIRE. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería.
- Catlett, C. E., Beckman, P. H., Sankaran, R., & Galvin, K. K. (2017). Array of things: A scientific research instrument in the public way. *Proceedings - 2017 2nd International Workshop on Science of Smart City Operations and Platforms Engineering, in Partnership with Global City Teams Challenge, SCOPE 2017*, 26–33. <https://doi.org/10.1145/3063386.3063771>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R.,

Morawska, L., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *Lancet (London, England)*, 389(10082), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)

Cromar, K. R., Duncan, B. N., Bartonova, A., Benedict, K., Brauer, M., Habre, R., Hagler, G. S. W., Haynes, J. A., Khan, S., Kilaru, V., Liu, Y., Pawson, S., Peden, D. B., Quint, J. K., Rice, M. B., Sasser, E. N., Seto, E., Stone, S. L., Thurston, G. D., & Volckens, J. (2009). Air Pollution Monitoring for Health Research and Patient Care. An Official American Thoracic Society Workshop Report. *Annals of the American Thoracic Society*, 16(10), 1207–1214. <https://doi.org/10.1513/ANNALSATS.201906-477ST>

deSouza, P., Anjomshoaa, A., Duarte, F., Kahn, R., Kumar, P., & Ratti, C. (2020). Air quality monitoring using mobile low-cost sensors mounted on trash-trucks: Methods development and lessons learned. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102239. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102239>

Desouza, P., Anjomshoaa, A., Duarte, F., Kahn, R., Kumar, P., & Ratti, C. (2020). Senseable City Lab :::: Massachusetts Institute of Technology SENSEABLE CITY LAB Air quality monitoring using mobile low-cost sensors mounted on trash-trucks: Methods development and lessons learned. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102239>

- English, P. B., Olmedo, L., Bejarano, E., Lugo, H., Murillo, E., Seto, E., Wong, M., King, G., Wilkie, A., Meltzer, D., Carvlin, G., Jerrett, M., & Northcross, A. (2017). The Imperial County Community Air Monitoring Network: A Model for Community-based Environmental Monitoring for Public Health Action. *Environmental Health Perspectives*, 125(7). <https://doi.org/10.1289/EHP1772>
- Falcon, E. V. C. (2021). Influencia de la concentración de material particulado respirable por fracciones de masa en la contaminación por polvo en la ciudad de Arequipa (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN).
- Feenstra, B. J. (2020). *UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE Development of Methodologies for the Use and Application of Air Quality Sensors to Enable Community Air Monitoring*.
- Gao, M., Cao, J., & Seto, E. (2015). A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM_{2.5} in Xi'an, China. *Environmental Pollution*, 199, 56–65. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2015.01.013>
- Gay, W. (2017). I2C LCD Displays. *Custom Raspberry Pi Interfaces*, 35–54. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2406-9_4
- Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. (2021). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en

el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. DOF, 63–74.

Hasenfratz, D., Saukh, O., Walser, C., Hueglin, C., Fierz, M., Arn, T., Beutel, J., & Thiele, L. (2015). Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes. *Pervasive and Mobile Computing*, 16(PB), 268–285. <https://doi.org/10.1016/J.PMCJ.2014.11.008>

Hassani, A., Castell, N., Watne, Å. K., & Schneider, P. (2023). Citizen-operated mobile low-cost sensors for urban PM2.5 monitoring: field calibration, uncertainty estimation, and application. *Sustainable Cities and Society*, 95, 104607. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2023.104607>

Im, U., Bauer, S. E., Frohn, L. M., Geels, C., Tsigaridis, K., & Brandt, J. (2023). Present-day and future PM2.5 and O3-related global and regional premature mortality in the EVA6.0 health impact assessment model. *Environmental Research*, 216, 114702. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114702>

Kerckhoffs, J., Wang, M., Meliefste, K., Malmqvist, E., Fischer, P., Janssen, N. A. H., Beelen, R., & Hoek, G. (2015). A national fine spatial scale land-use regression model for ozone. *Environmental Research*, 140, 440–448. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2015.04.014>

Khreis, H., Johnson, J., Jack, K., Dadashova, B., & Park, E. S. (2022). Evaluating the Performance of Low-Cost Air Quality Monitors in Dallas, Texas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1647. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19031647/S1>

- Kim, S.-Y., Yi, S.-J., Eum, Y. S., Choi, H.-J., Shin, H., Ryou, H. G., & Kim, H. (2014). Ordinary kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities. *Environmental Health and Toxicology*, 29, e2014012. <https://doi.org/10.5620/EHT.E2014012>
- Lee, C. H., Wang, Y. Bin, & Yu, H. L. (2019). An efficient spatiotemporal data calibration approach for the low-cost PM2.5 sensing network: A case study in Taiwan. *Environment International*, 130, 104838. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.05.032>
- Liu, H. Y., Schneider, P., Haugen, R., & Vogt, M. (2019). Performance Assessment of a Low-Cost PM2.5 Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway. *Atmosphere* 2019, Vol. 10, Page 41, 10(2), 41. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10020041>
- Liu, X., Jayaratne, R., Thai, P., Kuhn, T., Zing, I., Christensen, B., Lamont, R., Dunbabin, M., Zhu, S., Gao, J., Wainwright, D., Neale, D., Kan, R., Kirkwood, J., & Morawska, L. (2020). Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring. *Environmental Research*, 185. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2020.109438>
- Lung, S. C. C., Hien, T. T., Cambaliza, M. O. L., Hlaing, O. M. T., Oanh, N. T. K., Latif, M. T., Lestari, P., Salam, A., Lee, S. Y., Wang, W. C. V., Tsou, M. C. M., Cong-Thanh, T., Cruz, M. T., Tantrakarnapa, K., Othman, M., Roy, S., Dang, T. N., & Agustian, D. (2022). Research Priorities of Applying Low-Cost PM2.5 Sensors in Southeast Asian Countries. *International Journal of Environmental Research*

and Public Health 2022, Vol. 19, Page 1522, 19(3), 1522.
<https://doi.org/10.3390/IJERPH19031522>

Maldonado, J. M. (2009). Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería*, 30, 66–71.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932009000200009&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Marshall, J. D., Nethery, E., & Brauer, M. (2008). Within-urban variability in ambient air pollution: Comparison of estimation methods. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1359–1369. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2007.08.012>

Nothhelfer, M., Sperber, O., Todea, A. M., Schunke, B., Romazanowa, O., Schumacher, S., Bathen, D., & Asbach, C. (2023). Effect of an Aerosol Dryer on Ambient PM Measurements with SDS011 Low Cost Sensors during a Two-year Period in Duisburg, Germany. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(10), 230080. <https://doi.org/10.4209/AAQR.230080>

Pang, X., Chen, L., Shi, K., Wu, F., Chen, J., Fang, S., Wang, J., & Xu, M. (2021). A lightweight low-cost and multipollutant sensor package for aerial observations of air pollutants in atmospheric boundary layer. *The Science of the Total Environment*, 764. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142828>

RICO SOTO, K. G. (2018). Sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

- Sonawane, R. N., Ghule, A. S., Bowlekar, A. P., & Zakane, A. H. (2019). Design and Development of Temperature and Humidity Monitoring System. *Agricultural Science Digest*, 39(2), 114–118. <https://doi.org/10.18805/AG.D-4893>
- Syahputra Novelan, M. (2020). Monitoring System for Temperature and Humidity Measurement with DHT11 Sensor Using NodeMCU. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 5(10). www.ijisrt.com123
- Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y. C. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12). <https://doi.org/10.3390/IJERPH19127511>
- Ting Wu ; Zhejiang Shaohui Lu ; Yiping Tang, An in-pipe internal defects inspection system based on the active stereo omnidirectional vision sensor, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015 12th International Conference on. Aug 2015.
- Xu, X., Chen, X., Liu, X., Noh, H. Y., Zhang, P., & Zhang, L. (2016). Poster Abstract: Gotcha II - deployment of a vehicle-based environmental sensing system. *Proceedings of the 14th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys 2016*, 376–377. <https://doi.org/10.1145/2994551.2996714>
- Yu, M., Zhang, S., Zhang, K., Yin, J., Varela, M., & Miao, J. (2023). Developing high-resolution PM2.5 exposure models by integrating low-cost sensors, automated machine learning, and big human mobility data. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1223160. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1223160/BIBTEX>

Zafra-Pérez, A., Boente, C., de la Campa, A. S., Gómez-Galán, J. A., & de la Rosa, J. D. (2023). A novel application of mobile low-cost sensors for atmospheric particulate matter monitoring in open-pit mines. *Environmental Technology and Innovation*, 29. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2022.102974>