PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Monitorización de Partículas PM10 y PM2,5: Evaluación de sensores de Bajo Costó en Ambientes Controlados.

AUTOR/A: Diego Villa Morán

TITULACIÓN: Sonido e imagen

DIRECTOR/A: Juan Antonio Rodríguez Rama

TUTOR/A: María Pilar Ochoa Pérez

DEPARTAMENTO: Electrónica Física, Ingeniería Eléctrica y Física Aplicada

VºBº TUTOR/A

MIEMBROS DEL TRIBUNAL CALIFICADOR:

PRESIDENTE/A: Manuel Vázquez Rodríguez

TUTOR/A:

SECRETARIO/A: Laura Barrutia Poncela

FECHA DE LECTURA: 29 de septiembre de 2023 **HORA:** 10:30

CALIFICACIÓN:

EL SECRETARIO/LA SECRETARIA:

_____

1 DEDICATORIA

Por todos esos momentos en los que estuve a punto de abandonar, pero me acorde de ti. Todo este esfuerzo va en tú nombre.

2 Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincera gratitud a la Cátedra Fundación Cepsa - UPM y la iniciativa RES2+U UPM por la beca otorgada, han sido un pilar fundamental para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado. Este apoyo económico no solo ha posibilitado la adquisición de recursos técnicos esenciales para la investigación, sino que también ha sido un impulso en mi desarrollo académico y profesional.

Quisiera también agradecer al equipo Tellus, en particular a Juan Antonio Rodríguez, Javier Maroto y Domingo Alfonso, por su invaluable ayuda durante todo el proceso de realización de este proyecto. Su experiencia técnica y orientación han sido vitales para la resolución de problemas complejos y la consecución de los objetivos planteados. A través de sesiones de mentoría y revisión crítica, han contribuido significativamente a la calidad y rigor de este trabajo. Gracias por vuestra paciencia y tiempo.

Agradecer a mí tutora de proyecto Pilar Ochoa por hacer posible realizar este proyecto y estar dispuesta a ayudarme en todo momento.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a mi familia y amigos por su apoyo incondicional y ánimos durante toda mi etapa universitaria y, especialmente, en la etapa final de este Trabajo Fin de Grado. La importancia de un entorno favorable es incalculable y, en mi caso, ha sido crucial para mantener la motivación y la concentración necesarias para culminar este proyecto. Gracias a todos

3 Resumen

En el contexto contemporáneo, caracterizado por una creciente digitalización y un análisis intensivo de datos, la monitorización precisa de la contaminación atmosférica emerge como un imperativo de salud pública. Este proyecto se enfoca en la evaluación de la eficacia de los transductores de bajo coste para el monitoreo ambiental de partículas en suspensión de tamaños PM2.5 y PM10 en la Comunidad de Madrid, dada la nocividad comprobada de estas partículas para la salud humana. El objetivo central es determinar si los dispositivos de bajo coste pueden aportar datos fiables y escalables en un marco temporal prolongado para fortalecer la red de monitoreo existente compuesta por 24 estaciones fijas.

Se ha realizado una selección y análisis técnico de sensores económicos, centrada en sus especificaciones. De entre los modelos evaluados se han selecionado los sensores: Sensirion SEN54, SPS30, NOVA SDS011 y DFRobot SEN460. Estos sensores se han sometido a pruebas empíricas durante un periodo de 2 horas bajo condiciones controladas de 30ºC de temperatura y un 40% de humedad relativa. Empleando cuatro escenarios atmosféricos distintos e introduciendo un ahumador como fuente de emisión de partículas. El equipo Temtop M2000 2ª Nd sirvió como punto de referencia para la validación de los resultados.

Tras un procesado y análisis de los datos experimentales, se sugiere que el sensor SPS30 presenta características técnicas y de rendimiento que lo posicionan como un candidato viable para estudios más extensivos. Esto habilita la posibilidad de conducir análisis más exhaustivos en entornos de laboratorio, considerando criterios de calibración conforme a las normativas vigentes. La integración de sensores de bajo coste como el SPS30 puede potencialmente mejorar la densidad y resolución temporal de la red de monitoreo ambiental, subrayando la importancia de futuras investigaciones tras la puesta en marcha en este ámbito.

Abstract

In the contemporary context marked by escalating digitalization and data-intensive analysis, precise atmospheric pollution monitoring arises as a public health imperative. This project focuses on assessing the effiacy of low-cost sensors in environmental monitoring of airborne particulate matter, specifically PM2.5 and PM10, within the Community of Madrid, given their proven detrimental effects on human health. The core objective is to ascertain whether low-cost devices can deliver reliable and scalable data over an extended time frame, thereby augmenting the existing network of 24 fixed monitoring stations.

A meticulous selection and technical evaluation of economical sensors was conducted, grounded on their specifications. The chosen sensor models for empirical testing were Sensirion SEN54, SPS30, NOVA SDS011, and DFRobot SEN460. These sensors underwent experimental testing for a duration of 2 hours under controlled conditions 30ºC temperature and 40% relative humidity. Four distinct atmospheric scenarios were employed, with a smoke generator introduced as a particulate emission source. Telnet M2000 2ª Nd sensor served as the benchmark for data validation.

Experimental data suggest that the SPS30 sensor exhibits both technical and performance attributes that make it a viable candidate for more extensive studies. This opens the avenue for conducting comprehensive laboratory analyses, considering calibration criteria in accordance with current standards. The integration of low-cost sensors like the SPS30 has the potential to enhance both the spatial density and temporal resolution of the environmental monitoring network, emphasizing the critical need for future research in this domain after the implementation.

4 Índice

PROYECTO FIN DE GRADO 0
1 DEDICATORIA 1
2 Agradecimientos 3
3 Resumen 4
4 Índice 6
5 Abreviaturas, unidades y acrónimos 8
6 Introducción 9
6.1 Objetivos 11
6.2 Estructura del informe 11
7 Marco tecnológico 12
7.1 Digitalización 12
7.1.1 La importancia de los datos y su gestión 12
7.1.2 Cultura Data Driven 13
7.1.3 IoT 14
7.1.4 Tellus 15
7.1.5 Contaminación 16
7.1.6 Estado del arte actual: 18
7.1.7 Partículas en suspensión (PM10, PM2,5) 21
7.2 Normativas y valores límite 25
7.2.1 Emisores de partículas en suspensión principales 29
7.2.2 Métodos de detección de partículas en suspensión 33
7.3 Hardware 37
7.3.1 Sensores 37
7.3.2 Microcontroladores 45
7.3.3 Almacenamiento 49
7.3.4 Sensores de referencia 52
7.3.5 Sensores de temperatura 55
7.4 Software 60
7.4.1 Entorno de programación (Arduino IDE) 60
8 Descripción de la solución propuesta 61
8.1 Microcontrolador 61
8.2 Sistema de almacenamiento 61
8.3 Urna 62
8.4 Sensores 64

8.5 Sensor de referencia 64
8.6 Ensayo 65
9 Resultados y discusión 67
9.1 Tratamiento de los datos 67
9.2 Comparación de resultados entre sensores 70
9.3 Comparación de resultados entre los sensores y la instrumentación de referencia 75
9.4 Comparativa Bibliográfica 83
10 Impacto del proyecto 84
11 Conclusiones 87
11.1 Líneas futuras 88
12 Referencias 89
13 Bibliografía 94
14 Índice de figuras 96
Actualizadas a septiembre 2023. 96
15 Índice de tablas 98
Anexos 99
ANEXO A: Datos comparados Sensor con referencia 99
ANEXO B: Planificación temporal 107
ANEXO C: Estudio económico 109
ANEXO D: Datos sin filtrar 111
ANEXO E: Código de los Sensores 116
ANEXO F: Metodología 129

5 Abreviaturas, unidades y acrónimos

KPIs: Indicador Clave de Desempeño. Indicadores o valores cuantitativos que se pueden medir, comparar y monitorear, con el fin de exponer el desempeño de los procesos y trabajar en las estrategias.

IoT: Internet of the things. (IoT)

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible. ODS Y EGS

EDS: Estudios de Diseño Sostenible. ODS Y EGS

PM: materia particulada.

AQI: Índice de calidad del aire.

E/S: Entrada/Salida.

6 Introducción

Numerosos estudios han resaltado las adversas consecuencias de la contaminación atmosférica para la salud humana. Esto ha convertido la supervisión de los niveles de contaminantes, en especial en zonas urbanas con alta densidad poblacional, en una prioridad para las administraciones públicas. Se están estableciendo nuevas regulaciones, sistemas de monitoreo y estrategias de mitigación para abordar esta problemática. La monitorización constante y precisa de las partículas contaminantes es crucial para evaluar y controlar los riesgos para la salud y el medio ambiente, y para emitir alertas cuando sea necesario.

Un contaminante especialmente preocupante es el material particulado, en concreto las partículas menores de 2,5 µm (PM2,5). Estas partículas son las que tienen la capacidad de ingresar profundamente en los pulmones y pasar al flujo sanguíneo, lo que puede provocar graves problemas de salud.(Figura 1).

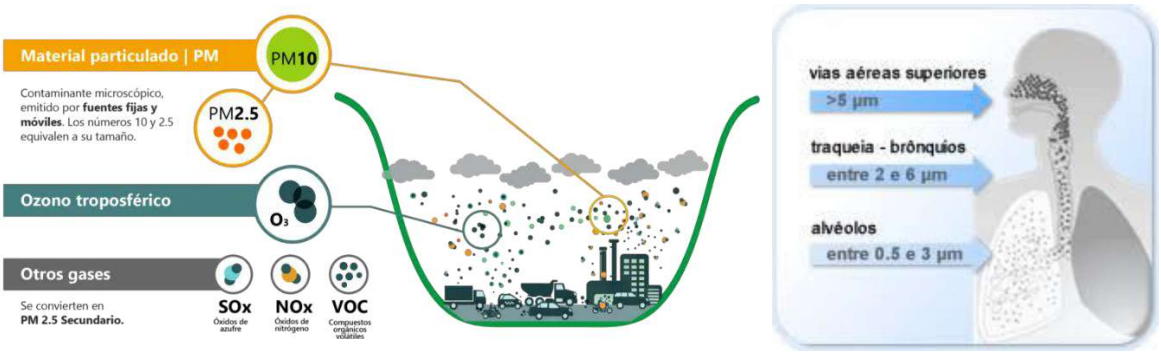


Figura 1.Contaminantes atmosféricos. Incidencia en la salud de las PM. (www.metropol.gov.co)

El estándar europeo para medir estas partículas recoge muestras en filtros expuestos durante 24 horas. Sin embargo, este método puede no ser el más eficaz en situaciones en las que se requiere una intervención inmediata. A pesar de que existen equipos precisos para esta tarea, su elevado costo los hace inaccesibles para muchos. Sin embargo, la evolución de sensores más asequibles, junto con avances en tecnologías de internet de las cosas (IoT) y comunicaciones de largo alcance, como LoRa, ofrecen nuevas oportunidades. Estos avances permiten la implementación de plataformas de monitoreo de bajo costo, lo que es beneficioso para el desarrollo de ciudades inteligentes que priorizan tanto la salud de los ciudadanos como la del medio ambiente.

Este proyecto (Figura 2) busca llenar un hueco en la investigación actual, ya que existen pocos estudios que validen la efectividad de estos sensores asequibles. El objetivo es comparar la precisión y exactitud de los datos obtenidos con estos dispositivos en relación con los equipos de referencia tradicionales. Asimismo, se busca analizar el costo y la viabilidad de su incorporación en sistemas de monitoreo en grandes metrópolis.

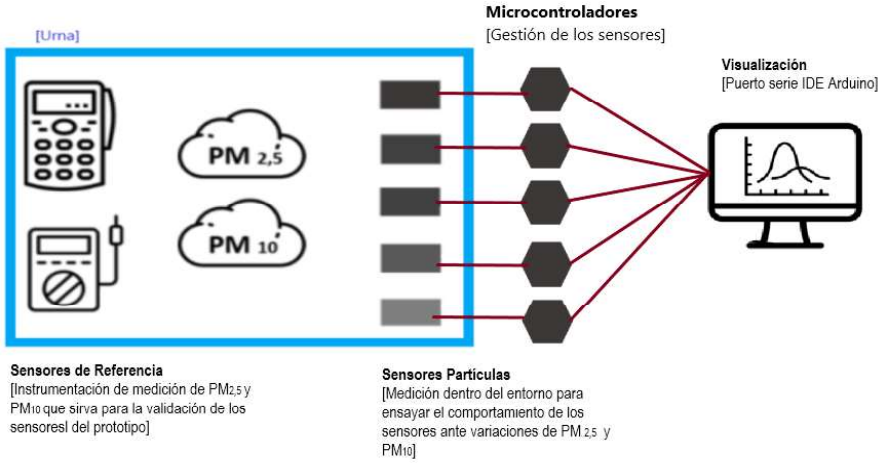


Figura 2. Esquema Simplificado del proyecto.

Este estudio busca potenciar la eficiencia de sistemas de monitoreo con alta precisión espacial y capacidad de datos. Su objetivo es respaldar decisiones relacionadas con la gestión de fuentes contaminantes y los riesgos ambientales vinculados. Los sensores utilizados destacan por ser compactos, tener una frecuencia de muestreo alta y usar tecnologías avanzadas, como la dispersión óptica de luz mediante láser y la teoría de Mie para determinar el tamaño de las partículas en distintos ambientes. Estos sensores son más asequibles que muchos equipos comerciales, como los mencionados en proyectos previamente financiados por la Cátedra Fundación Cepsa - UPM y la iniciativa RES2+U UPM.

En el futuro, estos dispositivos podrían ser esenciales para monitorear la calidad del aire en áreas verdes urbanas, como huertos comunitarios. Esta monitorización permitiría estimar la cantidad de partículas que los residentes podrían inhalar o que podrían depositarse en los cultivos. Con esta información, se podrían hacer análisis de riesgo más detallados, sugerir estrategias de mitigación y, eventualmente, integrar los huertos como parte de una red amplia de monitorización de calidad del aire, complementando así las estaciones oficiales.

Además, este estudio serviría como herramienta educativa y de concientización. Resaltando los problemas relacionados con la contaminación por partículas y mostrando cómo la industria comprometida con la sostenibilidad está tomando medidas para reducir su impacto.

6.1 Objetivos

Los objetivos a estudiar son los siguientes:

Estudio de los sensores de bajo coste ofertados y selección de una muestra representativa de los mismos. Así como de equipos de referencias que sirvan para validar los datos obtenidos.

Realizar el código de funcionamiento de los sensores seleccionados para IDE Arduino UNO, que permita a su vez almacenar datos en SD.

Realizar un ensayo representativo a pequeña escala para comprobar cuál puede ser el sensor con mayor correlación respecto del de referencia.

Dictaminar cual es el sensor con mayor correlación, mejores características técnicas y por tanto de mayor utilidad para la toma de datos de los seleccionados.

6.2 Estructura del informe

El informe se divide en una primera parte de análisis tecnológico de los equipos posibles, una siguiente sobre los equipos que se han decidido emplear, así como los motivos.

Siguiendo con el ensayo planteado y los resultados obtenidos.

Para finalizar se realizan conclusiones sobre los resultados y se abordan posibles líneas futuras.

7 Marco tecnológico

Se procede a realizar un análisis técnico de las tecnologias com mayor influencia em la realización del proyecto.

7.1 Digitalización

7.1.1 La importancia de los datos y su gestión

La importancia de la gestión de datos en la monitorización ambiental y la medición de niveles de inmisión de partículas es una cuestión crucial en la era moderna. Los datos son fundamentales para modelar, analizar y predecir estados ambientales. Una eficiente gestión de datos permite una interpretación precisa, contribuyendo directamente al diseño de políticas públicas y toma de decisiones informadas. Además, la calidad de los datos está directamente vinculada con la fiabilidad de los sensores utilizados para recopilar estos datos, lo que resalta la necesidad de sensores de bajo costo, pero altamente eficientes en el ámbito ambiental [1].

Toma de Decisiones: Los datos recopilados son cruciales para la toma de decisiones basada en evidencia. Especialmente en el campo del monitoreo ambiental, los datos pueden ser usados para instaurar políticas de salud pública y regular emisiones industriales [2].

Predicción y Modelado: Los datos históricos pueden ser usados para realizar modelos de predicción de niveles de inmisión de partículas, lo que podría llevar a la prevención de episodios de contaminación [3].

Optimización de Recursos: Una gestión adecuada de los datos permite el uso eficiente de recursos. Esto es especialmente cierto en redes de telecomunicaciones, donde los recursos como el ancho de banda son limitados [4].

Los métodos de gestión de datos han evolucionado significativamente en los últimos años, con tecnologías como Big Data y el análisis de datos en tiempo real desempeñando un papel importante [5]. En el contexto de telecomunicaciones, los protocolos de transmisión y almacenamiento de datos adquieren un papel crucial para garantizar que los datos recopilados sean accesibles y útiles. La adopción de estándares y protocolos uniformes es fundamental para asegurar la interoperabilidad y la eficiencia en el manejo de los datos [6].

Además, la seguridad de los datos recopilados es un tema cada vez más relevante, especialmente en aplicaciones que involucran datos sensibles o críticos. El cifrado y otros métodos de seguridad pueden implementarse para garantizar la integridad y confidencialidad de los datos [7].

7.1.2 Cultura Data Driven

La cultura "Data-Driven" (o cultura basada en datos) es un enfoque organizacional que pone énfasis en la toma de decisiones respaldada por datos en lugar de depender exclusivamente de la intuición o la experiencia previa. En un entorno Data-Driven, la adquisición, el procesamiento y el análisis de datos son actividades primordiales que guían la estrategia y las operaciones [8].

Las fases de toma de datos y procesado son (Figura 3) [9]:

1.Recolección de Datos: La primera fase implica la recolección de datos crudos desde diversas fuentes, que podrían incluir sensores, bases de datos, interacciones del usuario, etc. El objetivo es capturar la mayor cantidad de información relevante posible.

2.Almacenamiento y Gestión: Una vez recopilados, los datos deben almacenarse de manera segura y eficiente. Se emplean sistemas como bases de datos relacionales, NoSQL o almacenes de datos para gestionar grandes volúmenes de información.

3.Limpieza y Preparación: Antes de su análisis, los datos suelen requerir un proceso de limpieza para eliminar inexactitudes, redundancias y errores. También puede ser necesario transformar los datos para que sean útiles para el análisis posterior.

4.Análisis de Datos: Esta es la etapa en la que se aplican técnicas estadísticas y de aprendizaje automático para extraer patrones, correlaciones y conocimientos a partir de los datos preparados.

5.Visualización: Los resultados del análisis suelen visualizarse mediante gráficos, tablas y otros elementos gráficos para facilitar su interpretación.

6.Toma de Decisiones: Basándose en el análisis y la visualización, los responsables toman decisiones informadas. En el contexto de monitoreo ambiental, esto podría implicar la implementación de medidas para controlar la contaminación.

7.Retroalimentación y Mejora Continua: Finalmente, los resultados y decisiones son evaluados para determinar su eficacia. Los datos de esta evaluación se utilizan para refinar y optimizar el proceso para futuros ciclos.

Figura 3. Procesado de datos en cultura "data driven".

En el ámbito del monitoreo medioambiental, adoptar un enfoque centrado en datos (Data-Driven) no solo significa que las políticas y regulaciones se derivan de métricas y KPIs concretos en lugar de suposiciones [10], sino también que permite una calibración adecuada de los sensores económicos, aprovechando la información histórica y actual [11].

Además, en sistemas de telecomunicaciones, este enfoque garantiza una transmisión y procesamiento de datos eficiente, impulsando la mejora continua y la optimización de costos [12]. Gracias al análisis avanzado, se pueden ajustar los sistemas de monitoreo a requerimientos específicos, ofreciendo soluciones adaptadas a diferentes contextos y circunstancias ambientales [13].

7.1.3 IoT

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es un paradigma tecnológico que facilita la interconexión de dispositivos físicos y sistemas a través de la infraestructura de Internet (Figura 4). Este paradigma es un pilar fundamental en la Cuarta Revolución Industrial y constituye un elemento clave en el desarrollo de ciudades inteligentes, sistemas de transporte autónomos, y en la monitorización y control ambiental, entre otros ámbitos [14].

En un servicio IoT se dispone de:

Dispositivos/Sensores: Son los elementos que recopilan datos del entorno. Pueden ser sensores de temperatura, humedad, luz, partículas en el aire, etc. [15].

Conectividad: Una vez que los datos son recogidos, se envían a un servidor de nube o a un centro de datos a través de diferentes formas de conectividad como Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, o 5G [16].

Procesamiento de Datos: Los datos recopilados se procesan para extraer información útil. Esto puede ocurrir tanto en el borde (edge computing) como en la nube [17].

Interfaz de Usuario: Finalmente, la información procesada se presenta al usuario mediante una interfaz que puede ser una aplicación móvil, un tablero de control en un navegador web o incluso otro dispositivo conectado [18].

Figura 4. Esquema IoT. https://www.mokosmart.com/wp-content/uploads/2021/07/IoT-Hardware-1280x720.webp

7.1.4 Tellus

El ecosistema Tellus UPM (Figura 5) representa una infraestructura interdisciplinaria que amalgama digitalización, sostenibilidad y métodos pedagógicos basados en datos, configurando así un paradigma innovador para el abordaje de desafíos urbanos y ambientales. Este sistema se compone de diversas plataformas y laboratorios que actúan de manera sinérgica, conformando un entorno integrado de experimentación, monitorización y desarrollo.

Living Lab "La Pecera": Este laboratorio de vida actúa como un entorno de experimentación in situ que promueve la co-creación y participación activa de múltiples agentes, incluyendo estudiantes, docentes e interesados externos. La metodología empleada se basa en ciclos iterativos de diseño, pruebas y retroalimentación para la evaluación de prototipos en condiciones reales, lo que potencia la relevancia y aplicabilidad de las soluciones generadas.

Plataforma Tellus IoT: Este sistema constituye un elemento crucial para la recopilación y análisis de datos a gran escala. Mediante una red distribuida de sensores, se efectúa la monitorización remota de variables múltiples, lo que contribuye a la toma de decisiones fundamentada en análisis de datos. Su aplicación es esencial para el diseño y ejecución de soluciones urbanas inteligentes y sostenibles.

FabLab ETSIME-UPM: Este laboratorio ofrece recursos tecnológicos para la creación de prototipos y fabricación aditiva. Actúa como un catalizador para la innovación, permitiendo la materialización rápida de soluciones conceptuales a través de técnicas como la impresión 3D.

El enfoque holístico adoptado por el ecosistema facilita un marco pedagógico que empodera a los participantes para un involucramiento activo en el proceso de resolución de problemas. La cultura basada en datos sustenta la toma de decisiones empíricas, optimizando la eficiencia y relevancia de las intervenciones.

Este ecosistema universitario funciona como una simulación de escenarios urbanos, proporcionando un modelo escalable para la transición hacia entornos más sostenibles y digitalizados. En este contexto, se integran programas formativos como el de Emprendimiento Social de UESEVI-UPM, que incide en el desarrollo de habilidades y competencias en sostenibilidad y digitalización, preparando así a los estudiantes para los desafíos del entorno laboral futuro.

En términos de difusión y sensibilización, Tellus UPM implementa una estrategia de comunicación multiplataforma que incluye talleres, seminarios y redes sociales para fomentar una cultura de sostenibilidad e innovación entre la comunidad académica y más allá.

Figura 5. Tellus UPM logos. https://blogs.upm.es/tellus/wp-content/uploads/sites/957/2022/09/tellus_upm_banner_2022.png

7.1.5 Contaminación

La calidad del aire es un parámetro esencial que tiene un impacto significativo en la salud pública, la economía y el medio ambiente. La contaminación del aire está estrechamente vinculada con una variedad de problemas de salud, incluidas enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurodegenerativas (Tabla 1). Además, compromete la calidad de vida y puede tener efectos perjudiciales a largo plazo en los ecosistemas y en la biodiversidad. La monitorización precisa de los contaminantes del aire es, por lo tanto, de vital importancia para mitigar sus efectos adversos y para la formulación de políticas eficaces de gestión del aire.

Monóxido de Carbono (CO): Este gas incoloro e inodoro se produce principalmente a través de la combustión incompleta de combustibles fósiles. A altas concentraciones, puede ser peligroso para la salud humana, ya que interfiere con la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. La inhalación de altas concentraciones de CO puede llevar a la hipoxia, dado que este gas se une a la hemoglobina en la sangre, disminuyendo la capacidad de transporte de oxígeno. Los síntomas incluyen dolores de cabeza, mareos y, en casos extremos, la muerte. Es un gas de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático [19].

Óxidos de Nitrógeno (NOx): Estos compuestos, que incluyen NO y NO2, se generan principalmente a partir de procesos de combustión en vehículos y plantas industriales. Estos gases son precursores del ozono troposférico y pueden causar o agravar enfermedades respiratorias. La exposición prolongada a NOx puede resultar en inflamación de las vías respiratorias, empeoramiento del asma y disminución de la función pulmonar. El NOx es un precursor de la lluvia ácida, la cual puede corroer edificios, monumentos y otras estructuras [20].

Óxidos de Azufre (SOx): Compuestos como el SO2 se liberan durante la quema de carbón y petróleo. Estos gases pueden causar enfermedades respiratorias y contribuir a la formación de lluvia ácida. El SOx puede causar irritación en los ojos, nariz y garganta, y su inhalación crónica podría llevar a enfermedades respiratorias como bronquitis 9. El SOx es un precursor de la lluvia ácida, la cual puede corroer edificios, monumentos y otras estructuras [21].

Partículas PM10: Estas partículas, con un diámetro menor a 10 micrómetros, pueden incluir polvo, cenizas y hollín. Se inhalan fácilmente y pueden causar problemas respiratorios y cardiovasculares. [22]

Partículas PM2.5: Estas partículas tienen un diámetro menor a 2,5 micrómetros y son aún más peligrosas que las PM10 debido a su capacidad para penetrar más profundamente en los pulmones y más eficientemente en el torrente sanguíneo [23].

Estas partículas son especialmente perjudiciales, ya que pueden penetrar en las vías respiratorias y alveolares, ocasionando desde irritaciones hasta enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón

Ozono (O3): Aunque el ozono es beneficioso en la estratósfera para bloquear los rayos ultravioletas, en la troposfera actúa como un potente irritante respiratorio y un contaminante peligroso para la salud. Altas concentraciones de ozono son tóxicas y pueden causar o empeorar enfermedades respiratorias como asma y bronquitis crónica. En niveles bajos de la atmósfera puede dañar cultivos y otras plantas, disminuyendo el rendimiento agrícola [24].

Plomo (Pb): Aunque su presencia ha disminuido debido a regulaciones más estrictas, el plomo sigue siendo un contaminante peligroso que puede afectar el sistema nervioso y el desarrollo cerebral, especialmente en niños [25].

Compuestos Orgánicos Volátiles (COV): Estos compuestos se liberan a partir de una variedad de fuentes, incluidos vehículos y productos industriales. Pueden contribuir a la formación de ozono y smog [26].

Amoniaco (NH3): Principalmente liberado a través de actividades agrícolas, el amoniaco puede contribuir a la formación de partículas en la atmósfera y afectar la calidad del aire [27].

Tabla 1. Niveles de contaminantes del aire y su grado de riesgo. [28] [29] [30] [31] [32]

Contaminante	Niveles en µg/m³	Estado de la Calidad del Aire
Partículas PM2.5	0-12	Inofensivo
Partículas PM2.5	13-35.4	Moderado
Partículas PM2.5	35.5-55.4	Dañino para grupos sensibles
Partículas PM2.5	55.5-150.4	Dañino
Partículas PM2.5	>150.5	Muy Dañino
Partículas PM10	0-54	Inofensivo
Partículas PM10	55-154	Moderado
Partículas PM10	155-254	Dañino para grupos sensibles
Partículas PM10	255-354	Dañino
Partículas PM10	>355	Muy Dañino
Monóxido de Carbono (CO)	0-4.4	Inofensivo
Monóxido de Carbono (CO)	4.5-9.4	Moderado
Monóxido de Carbono (CO)	9.5-12.4	Dañino para grupos sensibles
Monóxido de Carbono (CO)	12.5-15.4	Dañino
Monóxido de Carbono (CO)	>15.5	Muy Dañino
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	0-53	Inofensivo
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	54-100	Moderado
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	101-360	Dañino para grupos sensibles
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	361-649	Dañino
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	>650	Muy Dañino
Óxidos de Azufre (SOx)	0-35	Inofensivo
Óxidos de Azufre (SOx)	36-75	Moderado

7.1.6 Estado del arte actual:

La Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid ha sido establecida y revisada conforme a estudios de zonificación realizados en los años 2005, 2010 y 2014 por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Dichas revisiones han tenido en cuenta tanto la normativa nacional como la europea, específicamente la Directiva 2008/50/CE y el Real Decreto 102/2011, que establecen directrices para la calidad del aire ambiente y la reducción de la contaminación atmosférica. El análisis realizado en 2014 mantuvo la zonificación previa e introdujo ajustes en las estaciones de Colmenar Viejo, Collado Villalba, Coslada y Villa del Prado para alinearse con los criterios de micro y macroimplantación. Se observó una disminución en la necesidad de medir concentraciones de CO, SO2 y benceno, pero un incremento en la medición de PM2,5, reflejando las tendencias y preocupaciones actuales en calidad del aire [33].

En enero de 2019, la red se amplió con una nueva estación de fondo rural remota situada en el Puerto de Cotos. Esta adición es relevante para monitorizar las concentraciones de ozono en áreas distantes de emisores primarios y evaluar la influencia altitudinal en su variación. Esta estación también contribuye al estudio de contaminantes con alta relevancia para el cambio climático [34].

La red actual se compone de 24 estaciones fijas de medición repartidas en seis zonas homogéneas del territorio madrileño (Tabla 2. Estaciones de medición de partículas en suspension en la comunidad de madridTabla 2):

Tres en zonas urbanas (Corredor del Henares, Urbana Sur y Urbana Noroeste)

Tres en zonas rurales (Cuenca del Tajuña, Cuenca del Alberche y Sierra Norte). Además, existe una séptima zona gestionada por el Ayuntamiento de Madrid con su propia infraestructura de estaciones [33]..

Las estaciones de la red están caracterizadas en función de diferentes tipos de contaminantes como monóxido de carbono, dióxido de azufre, benceno, metales, , PM10, PM2,5, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno y ozono. En base a las zonificaciones, se pueden categorizar en ocho estaciones de tráfico, dos industriales y catorce de fondo. Según el tipo de área en relación con el ozono, diez son urbanas, ocho suburbanas y seis rurales, de las cuales cuatro son consideradas remotas y dos regionales [33].

Tabla 2. Estaciones de medición de partículas en suspension en la comunidad de madrid. [33].

		modelos								
UBICACIÓN	Equipos	PM10	PM2,5	notas adicionales	Coste estimado Equipo	Instalación	Mantenimiento (10%)	Software de Análisis	tros Costos (transport	Total (€)
ALCALÁ DE HENARES	METONE BAM-1020	C-2093		Área con tráfico y actividad industrial.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
ALCOBENDAS	METONE BAM-1020	C-2093		Zona residencial y comercial, emisiones vehiculares.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
ALGETE	METONE BAM-1020	E5896	E6396	Actividades agrícolas y de tráfico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
ARGANDA DEL REY	METONE BAM-1020	E5890		Zona industrial, partículas y gases tóxicos.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
COSLADA	METONE BAM-1020	C-2084		Puerto seco, emisiones de transporte.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
RIVAS-VACIAMADRID	METONE BAM-1020	E5894		Zona residencial, calidad del aire doméstico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
TORREJÓN DE ARDOZ	METONE BAM-1020	C-2086-6		Base militar y actividad industrial.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
ALCORCÓN	METONE BAM-1020	C-2090		Actividad industrial y tráfico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
ARANJUEZ	METONE BAM-1020	A2838		Zona turística, salud pública.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
FUENLABRADA	METONE BAM-1020	C-2085		Área industrial.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
GETAFE	METONE BAM-1020	C-2092		Emisiones industriales y de tráfico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
LEGANÉS	METONE BAM-1020	C-2088		Zona residencial y educativa, salud pública.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
MÓSTOLES	METONE BAM-1020	C-2091		Zona residencial con tráfico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
VALDEMORO	METONE BAM-1020	F6395	F1795	Actividades industriales.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
COLMENAR VIEJO	METONE BAM-1020	A2840		Zona rural y residencial, emisiones agrícolas.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
COLLADO VILLALBA	METONE BAM-1020	E5186	E5892	Importancia turística y residencial.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
MAJADAHONDA	METONE BAM-1020	A2837		Zona residencial, calidad del aire doméstico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
EL ATAZAR	METONE BAM-1020	E5897	F1257	Zona rural, actividades agrícolas.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
GADALIX DE LA SIERRA	METONE BAM-1020	F1255	F1256	Emisiones de actividades rurales y tráfico.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
PUERTO DE COTOS	METONE BAM-1020			Zona turística y natural, conservación ambiental.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
SAN MARTÍN DE VALDEIGLESIAS	METONE BAM-1020	A2839		Zona rural, actividades agrícolas.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
VILLA DEL PRADO	METONE BAM-1020	E5891	F1253	Actividades agrícolas y rurales.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
ORUSCO DE TAJUÑA	METONE BAM-1020	F1796		Actividades agrícolas.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
VILLAREJO DE SALVANÉS	METONE BAM-1020	E5893	C2087	Zona rural, conservación ambiental.	12000-15000	1000-3000	1200-1500	2000-5000	1000-2000	17200-26500
										412.800-636.000

De la Tabla 2 se obtiene la media de estas estaciones ronda los 20.000 €, siendo equipos Metone BAM 1020. Del modelo exacto se determina su capacidad de medición de particulado en suspensión. Con un precio total destinado a los quinientos mil euros.

En la siguiente Tabla 3 se estudia el caso para las pertenecientes a Madrid centro.

Tabla 3. Estaciones de medición de partículas en suspension en Madrid. En verde operativo, rojo no operativo.

			Porcentaje valido					
Barrio	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	Tipo de Sensor más probable	Ubicación	Precio Estimado (€)	Notas
ESC. Aguirre			85%	85%	BAM	Centro	20,000 - 30,000	Zona de alto tráfico
Farolillo			85%		BAM	Tetuán	20,000 - 30,000	Zona residencial
Casa de campo			98%	98%	BAM o TEOM	Moncloa-Aravaca	15,000 - 30,000	Zona menos densamente poblada
Moratalaz			96%		TEOM	Moratalaz	15,000 - 25,000	Zona residencial
Cuatro caminos			84%	83%	BAM	Tetuán	20,000 - 30,000	Zona de alto tráfico
Vallecas			99%		TEOM	Puente de Vallecas	15,000 - 25,000	Zona residencial
Mendez alvaro			94%	94%	TEOM	Arganzuela	15,000 - 25,000	Cerca de estación de autobuses
Castellana			98%	98%	BAM	Chamartín	20,000 - 30,000	Zona de alto tráfico
Pza. castilla			93%	93%	BAM	Chamartín	20,000 - 30,000	Zona de alto tráfico
Urb. Embajada			94%		BAM o TEOM	Hortaleza	15,000 - 30,000	Zona residencial
Pza elíptica			97%	97%	BAM	Usera	20,000 - 30,000	Zona de alto tráfico
Sanchinarro			98%	98%	TEOM	Hortaleza	15,000 - 25,000	Zona residencial
Tres olivos			97%		BAM o TEOM	Fuencarral-El Pardo	15,000 - 30,000	Zona residencial
J.m. moratalaz				---	TEOM	Moratalaz	15,000 - 25,000	Zona residencial
C.c.alfredo kraus				---	BAM o TEOM	Fuencarral-El Pardo	15,000 - 30,000	Zona residencial

7.1.7 Partículas en suspensión (PM10, PM2,5)

Las partículas en suspensión en el aire, también conocidas como material particulado (PM), son un grupo heterogéneo de partículas sólidas y líquidas que varían en forma, tamaño y composición química. Estas partículas son especialmente relevantes en el contexto de la calidad del aire y la salud pública, dada su capacidad para penetrar en los sistemas respiratorio y circulatorio humano (Figura 6), provocando una amplia gama de efectos adversos para la salud3637.

El material particulado se clasifica comúnmente según su tamaño aerodinámico en diámetros de menos de 10 micrómetros (PM10) y menos de 2,5 micrómetros (PM2.5). Mientras que las partículas PM10 pueden penetrar en las vías respiratorias superiores y en los pulmones, las partículas PM2.5 son lo suficientemente pequeñas para entrar en los alvéolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo, planteando riesgos más significativos para la salud38.

Los estándares de calidad del aire para el material particulado varían según las directrices y reglamentaciones nacionales e internacionales, pero en general, los límites más estrictos suelen aplicarse a las partículas PM2.5 debido a su mayor potencial para causar daño39. La monitorización continua de estos contaminantes es fundamental tanto para la evaluación de riesgos como para el diseño de políticas de control de la contaminación eficaces.

La exposición a partículas de diámetro menor a 10 micrómetros (PM10) es un problema de salud pública que ha sido ampliamente estudiado. Estas partículas son lo suficientemente pequeñas como para ser inhaladas y algunas pueden llegar a penetrar y alojarse en los alvéolos pulmonares (generalmente se encuentran en las vías respiratorias superiores), lo que puede resultar en una serie de efectos adversos para la salud.

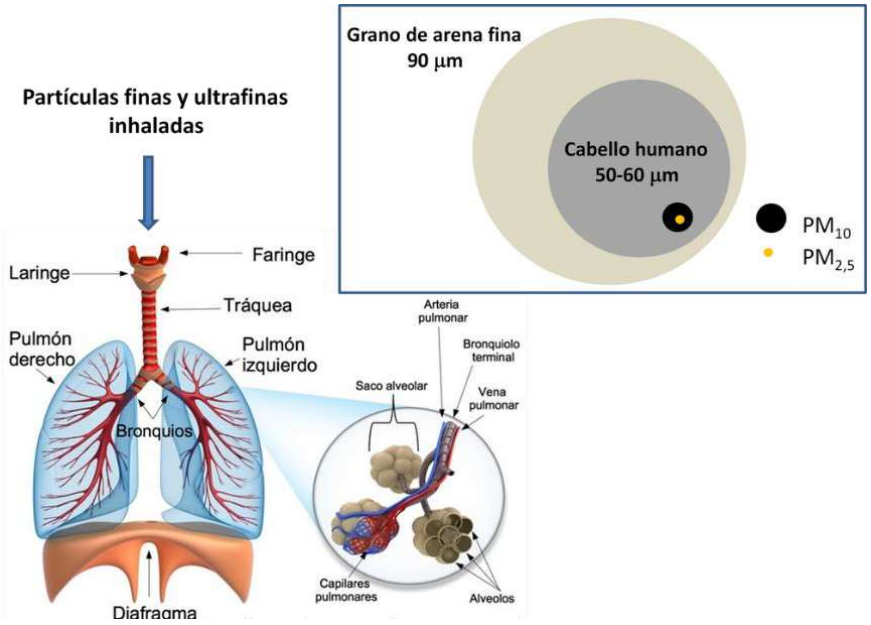


Figura 6. Tamaño de las partículas en suspensión. https://www.eulixe.com/asset/thumbnail,992,558,center,center/media/eulixe/images/2021/01/26/20210126100654 57487.png

Uno de los efectos más inmediatos de la exposición a PM10 es el deterioro de la función pulmonar. Esto puede manifestarse en síntomas como tos, sibilancias y dificultad para respirar. Existen evidencias de que las PM10 aumentan las tasas de hospitalización por enfermedades respiratorias agudas y crónicas Figura 7, incluidas la bronquitis y el asma [35].

Los estudios han demostrado que las PM10 también están asociadas con un aumento en el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Este efecto puede ser resultado de la inflamación sistémica causada por las partículas en los pulmones, que luego se propaga al sistema circulatorio [36].

La exposición prolongada a PM10 puede llevar a enfermedades más graves como el cáncer de pulmón y enfermedades cardíacas crónicas. Estudios epidemiológicos han relacionado la exposición a largo plazo con una reducción de la esperanza de vida [37].

Los niños, ancianos y personas con enfermedades crónicas preexistentes son especialmente vulnerables a los efectos de las PM10. En estos grupos, incluso niveles bajos de exposición pueden llevar a efectos adversos significativos [38].

En términos matemáticos, algunos estudios han intentado cuantificar el riesgo asociado a la exposición a PM10. Por ejemplo, se ha estimado que cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración de PM10 puede llevar a un aumento del 1% en la mortalidad diaria [39] (Figura 7).

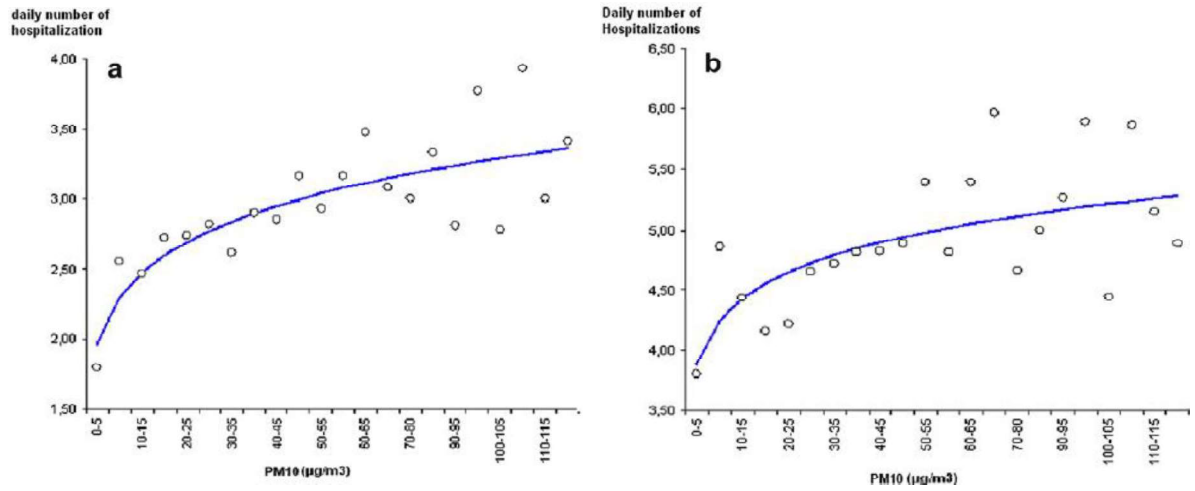


Figura 7. Número de hospitalizaciones diarias vs concentración PM en el aire.

La exposición a partículas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros (PM2.5) es aún más preocupante que la exposición a PM10 desde una perspectiva de salud pública. Las PM2.5 son partículas finas que pueden penetrar más profundamente en los pulmones y más fácilmente en el torrente sanguíneo. (Figura 8)

La exposición a PM2.5 está fuertemente relacionada con varios problemas respiratorios, incluido un mayor riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y asma. Estas partículas pueden depositarse en las vías respiratorias, causando inflamación y exacerbando enfermedades pulmonares preexistentes [40].

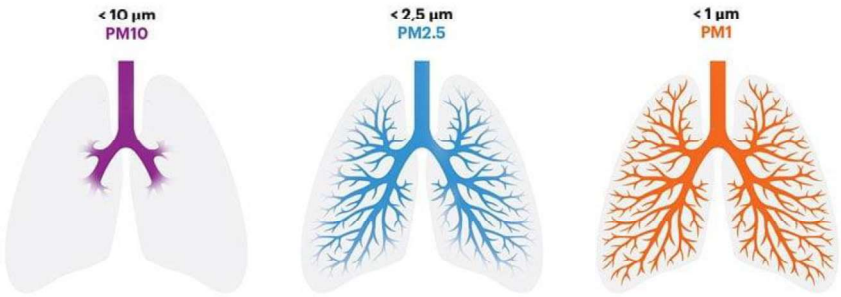


Figura 8. Zonas de mayor afección de las partículas en suspensión según su tamaño. https://www.safera.com/wp-content/uploads/2022/11/small-particles-PM1-PM2.5-PM10-lungs.jpg

Los estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición a corto y largo plazo a PM2.5 aumenta el riesgo de enfermedad cardiovascular, incluidos ataques cardíacos y accidentes cerebrovasculares (Figura 9). Las partículas finas pueden provocar inflamación vascular y aterosclerosis [40].

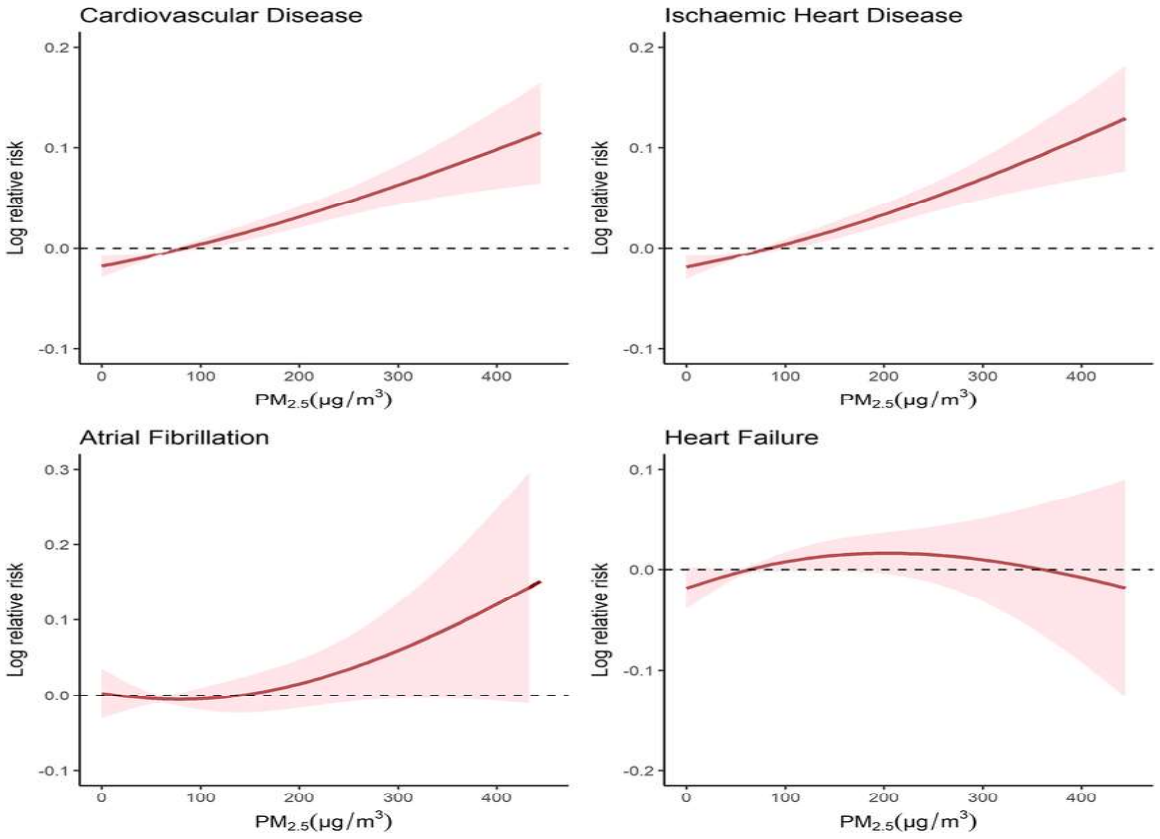


Figura 9. Relaciones entre enfermedades y PM2,5. https://www.researchgate.net/publication/334846248/figure/fig2/AS:963229450772481@1606663205574/Exposure-response-relationship-curves-for-the-association-between-hospital-admissions-for.png

Los estudios han correlacionado el aumento de las concentraciones de PM2.5 con un aumento en la mortalidad diaria. Se estima que cada incremento de 10 µg/m³ en la concentración ambiental de PM2.5 está asociado con un aumento aproximado del 1.5% en la mortalidad diaria [41] (Figura 10).

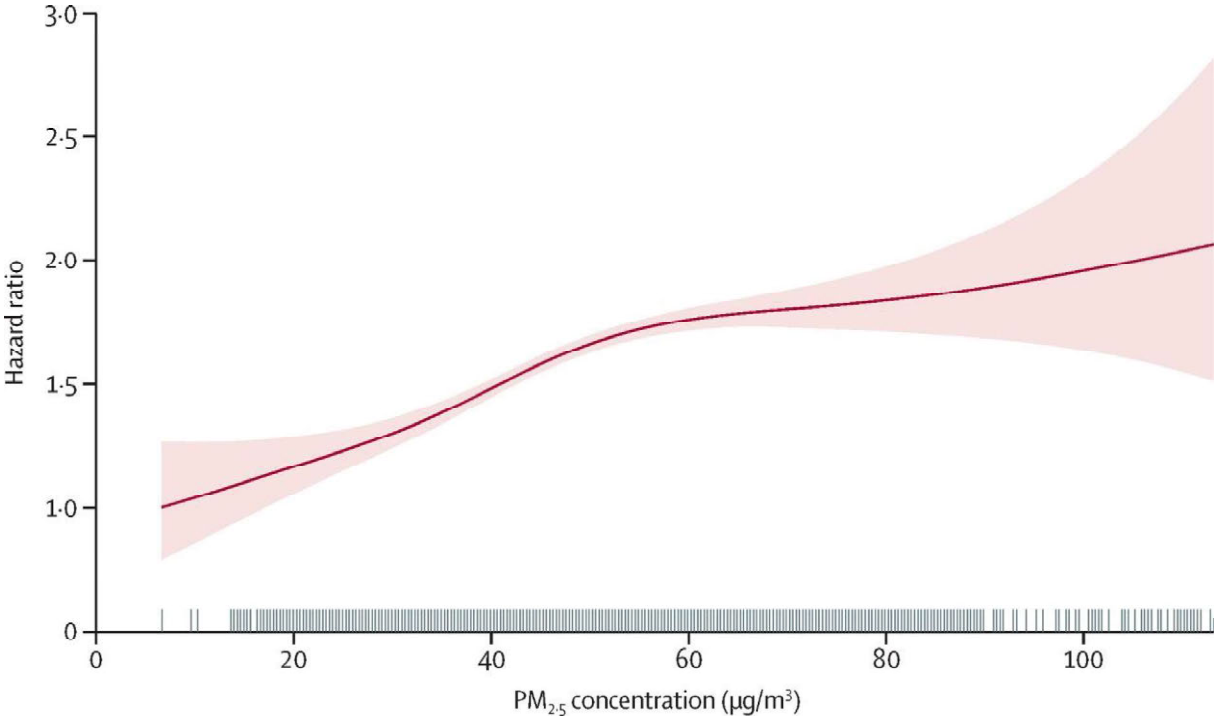


Figura 10. Relación entre mortalidad y concentración PM2,5.
https://www.thelancet.com/cms/attachment/64d2c6b9-bfe2-4e17-9056-cc84683667d1/gr2.jpg

Existen crecientes pruebas que sugieren que la exposición a PM2.5 también podría tener implicaciones en la salud neurológica, incluyendo un mayor riesgo de enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y el Parkinson [42].

Los grupos demográficos como los niños, ancianos y personas con enfermedades preexistentes son particularmente susceptibles a los efectos de las PM2.5. Incluso la exposición a corto plazo puede resultar en efectos significativos sobre la salud en estos grupos [43].

Desde un enfoque matemático, se ha desarrollado el índice de calidad del aire (AQI, por sus siglas en inglés) para cuantificar el riesgo de exposición a partículas, incluidas las PM2.5. Este índice se usa comúnmente para comunicar los riesgos para la salud pública [44].

7.2 Normativas y valores límite

A nivel europeo, la Directiva 2008/50/EC del Parlamento Europeo y del Consejo establece los estándares de calidad del aire y límites de emisión de partículas PM10 y PM2.5, entre otros contaminantes. Para PM10, el límite anual está fijado en 40 µg/m³ y para el valor diario en 50 µg/m³, que no puede ser superado más de 35 veces en un año calendario. Para PM2.5, el límite anual es de 25 µg/m³.

En España, el Real Decreto 102/2011 transpone la directiva europea y establece los valores límite nacionales. Además, describe las zonas y aglomeraciones en las que debe medirse la calidad del aire, así como los métodos de evaluación y las acciones a tomar en caso de superación de los límites establecidos.

En el ámbito de la Comunidad de Madrid, el Plan Azul+ integra las directrices de actuación en relación con la calidad del aire. Este plan establece diferentes escenarios de actuación dependiendo de las concentraciones de partículas y otros contaminantes.

El **Real Decreto 102/2011**, de 28 de enero, está orientado a la mejora de la calidad del aire en España. Este decreto tiene como objetivo la transposición y adaptación de las directrices establecidas en la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

El decreto establece los criterios para el control y monitoreo de la calidad del aire con respecto a una variedad de contaminantes. Se proporcionan directrices específicas para el establecimiento de objetivos relacionados con la calidad del aire y su cumplimiento. Además, este documento normativo describe las responsabilidades y acciones requeridas para las autoridades, abarcando desde la monitorización hasta las medidas que deben adoptarse en caso de que los niveles de contaminantes excedan los límites establecidos.

Los contaminantes que cubre el Real Decreto 102/2011 incluyen dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno (NOx), partículas (PM10 y PM2.5), plomo, benceno y ozono, entre otros. Se establecen valores límite para la concentración de estos contaminantes en el aire ambiente y se detallan las metodologías de medición y evaluación a seguir.

Objetivos de Calidad del Aire: Este decreto establece los valores límite y niveles objetivo para diversos contaminantes, incluidos los PM10 y PM2,5, en conformidad con las directrices de la Unión Europea.

Zonas y Aglomeraciones: Al igual que la Directiva 2008/50/CE, propone una zonificación del territorio para la evaluación y gestión de la calidad del aire.

Sistemas de Medición: Detalla los requisitos para los sistemas de medición y validación de datos.

Información al Público: El Real Decreto enfatiza la importancia de mantener informado al público sobre la calidad del aire y los niveles de contaminantes.

Planes y Programas: Insta a la elaboración de planes y programas para mejorar la calidad del aire en zonas donde se superan los niveles permitidos.

Revisiones y Actualizaciones: Se tiene prevista la revisión y actualización periódica de los parámetros, lo que implica la necesidad de sistemas de monitoreo adaptativos y actualizables.

La **Directiva 2008/50/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, sobre calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa, establece las normas y límites para una variedad de contaminantes atmosféricos. Esta Directiva es un elemento clave en la regulación de la calidad del aire dentro de los Estados miembros de la Unión Europea y se focaliza en el control y la reducción de la exposición a sustancias contaminantes como el dióxido de azufre (SO2), los óxidos de nitrógeno (NOx), las partículas en suspensión (PM10 y PM2.5), el ozono (O3), el arsénico, el cadmio y el benceno.

Una de las principales contribuciones de la Directiva 2008/50/CE es la introducción de un marco uniforme para la evaluación y el control de la calidad del aire. Esto implica que los Estados miembros deben implementar programas de monitoreo del aire y establecer planes y programas para mantener y mejorar la calidad del aire. La Directiva también exige que la información sobre la calidad del aire sea accesible al público, lo cual impulsa la transparencia y el compromiso público en la gestión ambiental.

Límites de Concentración: Establece valores límite para distintos contaminantes atmosféricos, incluidas partículas PM10 y PM2.5. Estos límites son útiles como referencia para evaluar la eficacia de los sensores de bajo costo en la monitorización de la calidad del aire.

Zonificación y Evaluación: Se estipula que los Estados miembros deben dividir sus territorios en zonas y aglomeraciones para la evaluación de la calidad del aire.

Se define una aglomeración como un área que tiene una población de al menos 250,000 habitantes o, si la densidad poblacional justifica la necesidad de una evaluación y gestión del nivel de calidad del aire, podría ser también una zona con menor población

Métodos de Medición y Evaluación: Establece directrices sobre los métodos de medición y las técnicas de evaluación. Estos métodos podrían servir como un estándar de referencia contra el cual comparar la precisión y fiabilidad de los sensores de bajo costo.

Calidad de los Datos: Incluye requisitos sobre la calidad de los datos recogidos, lo cual es crucial para la validación de los resultados obtenidos mediante el uso de tecnologías de bajo costo.

Información Pública: Exige la disponibilidad y difusión de información actualizada sobre la calidad del aire para el público, lo cual podría ser un aspecto relevante si su proyecto incluye un componente de concienciación pública o difusión de información.

Revisión y Actualización: Contempla la revisión periódica de los límites y métodos de medición, lo que subraya la importancia de mantener actualizados los métodos y tecnologías de monitorización.

La **Directiva 2015/1480/UE** de la Comisión Europea, promulgada el 28 de agosto de 2015, modifica los anexos de las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE. Su objetivo es clarificar y actualizar los métodos de medición y las técnicas de muestreo para varios contaminantes atmosféricos, incluidas las partículas en suspensión como PM10 y PM2.5. Dada su focalización en métodos de medición y técnicas de muestreo, esta

Directiva es especialmente pertinente para cualquier trabajo que se proponga evaluar la efectividad, precisión y fiabilidad de sensores de bajo costo en la monitorización de niveles de inmisión de partículas.

Precisión y Calibración: aborda la necesidad de mantener una alta precisión en las mediciones.

Técnicas de Muestreo: aborda técnicas de muestreo para mediciones de contaminantes.

Criterios de Calidad de Datos: establece criterios para la calidad de los datos recopilados.

Se ha realizado la Tabla 4 para comprender la directiva y real decreto:

Tabla 4. Real decreto 102/2011 y Directiva 2008/50/CE.

Parámetro	Directiva 2008/50/CE	Real Decreto 102/2011	Notas
Métodos de Referencia			
PM10	EN 12341	UNE-EN 12341	
PM2.5	EN 14907	UNE-EN 14907	
Especificación de Equipo	Muestreador de flujo constante	Muestreador de flujo constante	
Volumen de Muestreo (PM10 y PM2.5)	2.3 m³/h	2.3 m³/h	
Filtración	Filtros de fibra de vidrio o de membrana Teflón	Filtros de fibra de vidrio o de membrana Teflón	
Condiciones Ambientales	20-30°C, Humedad < 55%	20-30°C, Humedad < 55%	
Calidad de Datos			
Rango de Concentración	0-1,000 µg/m³ (PM10 y PM2.5)	0-1,000 µg/m³ (PM10 y PM2.5)	
Incertidumbre de Medición (PM10 y PM2.5)	≤ 25%	≤ 25%	Según directrices QA/QC (Quality Assurance/Quality Control)
Exactitud	± 5 µg/m³ o ± 25%	± 5 µg/m³ o ± 25%	
Técnicas de Muestreo			
Tiempo de Muestreo	24 horas	24 horas	
Frecuencia de Muestreo	Diaria	Diaria	
Estabilidad de Flujo	± 4%	± 4%	
Métodos de Evaluación y Evaluación			
Evaluación de Modelos	Requerida	Requerida	Uso de modelos complementarios con validación experimental
Verificación de Calibración	Semestral	Semestral	Procedimientos definidos para verificación del equipo
Objetivos de Calidad del Aire			
PM10 (objetivo a largo plazo)	Reducción del 10-20% en 2020	Reducción del 10-20% en 2020	Basado en niveles de 2010
PM2.5 (objetivo a largo plazo)	Reducción del 15% en 2020	Reducción del 15% en 2020	Basado en niveles de 2010
Valores límite anuales	40 µg/m³ para PM10; 25 µg/m³ para PM2.5	40 µg/m³ para PM10; 25 µg/m³ para PM2.5	Niveles máximos anuales permitidos
Definición de Aglomeraciones			
Población	≥ 250,000 personas	≥ 250,000 personas	O una densidad de población que justifique la alta concentración
Área	Depende de la densidad de población	Depende de la densidad de población	Se refiere al espacio geográfico de la aglomeración

7.2.1 Emisores de partículas en suspensión principales

Se ilustra la Tabla 5 con los principales emisores de partículas y una descripción de cada emisor posterior.

Tabla 5. Principales emisiones partículas en suspensión comunidad de Madrid.

Fuente de Emisión	Tipo de Fuente	Notas
Transporte por carretera	Antropogénica	Principalmente vehículos diésel
Residencial/Comercial	Antropogénica	Calefacción y cocina
Actividades de construcción	Antropogénica	Resuspensión de polvo y partículas
Industria manufacturera	Antropogénica	Procesos de combustión y maquinaria
Agricultura	Antropogénica	Fertilizantes y resuspensión de suelos
Centrales térmicas	Antropogénica	Combustión de carbón y gas
Fuentes naturales	Natural	Incluye incendios forestales
Polvo del Sáhara	Natural	Eventos esporádicos

Junto a las Figuras 12 y 13. De las que se comprende cuáles son las mayores fuentes de particulado en suspensión para varias zonas de la comunidad de Madrid.

Siendo el transporte el máximo generador seguido de la agricultura y medio natural.

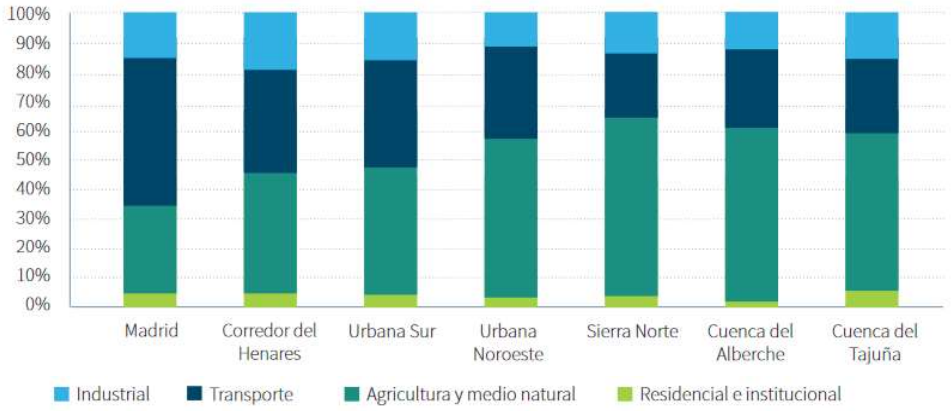


Figura 11. Resultados del análisis de contribución de fuentes en las diferentes zonas de calidad del aire (Comunidad deMadrid).

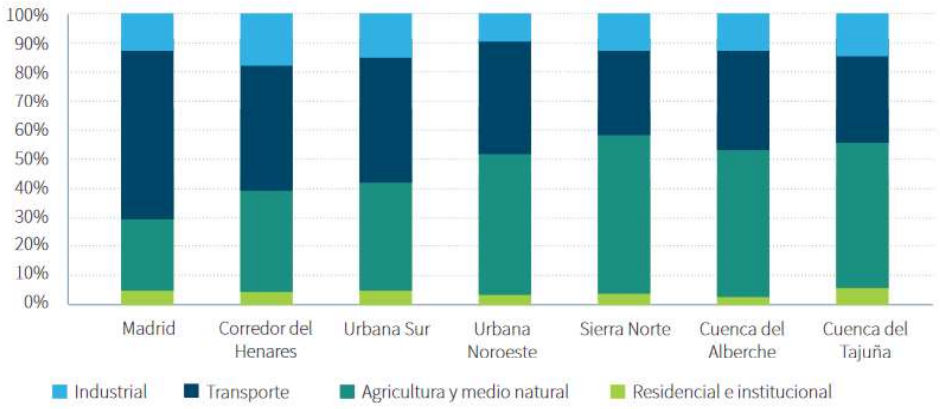


Figura 12. Resultados del análisis de contribución de fuentes en las diferentes zonas de calidad del aire (Comunidad de Madrid).

Los vehículos de motor generan partículas en suspensión a través de varios mecanismos:

Combustión del motor: La combustión incompleta en el motor da lugar a la emisión de partículas sólidas y compuestos orgánicos volátiles que pueden condensarse en partículas [45].

Desgaste de frenos y neumáticos: El desgaste mecánico también contribuye a la generación de partículas [46].

Resuspensión: Los vehículos que se desplazan a alta velocidad pueden resuspender partículas ya depositadas en la carretera [47].

Los factores que contribuyen a la emisión de partículas incluyen el tipo de vehículo, el tipo de combustible, la velocidad del vehículo y las condiciones del camino. Un estudio mostró que los automóviles diésel emiten en promedio 10 veces más PM10 que los automóviles de gasolina [48].

La tasa de emisión de PM10 en vehículos diésel ha sido estimada en aproximadamente 0.13 g/km, y la de PM2.5 en 0.08 g/km [49].

El transporte por carretera contribuye significativamente a la calidad del aire en áreas urbanas. Por ejemplo, en la Unión Europea, se estima que el 50% de todas las emisiones de partículas PM10 y PM2.5 provienen del transporte por carretera [50].

La calefacción influye en la contaminación PM por las siguientes fuentes:

Combustión de Biomasa: La quema de madera en estufas o chimeneas puede generar una alta concentración de PM, especialmente PM2.5. La eficiencia de la combustión y el tipo de madera utilizada pueden afectar la cantidad de PM emitidas [51].

Calderas de Gas y Diésel: Estos dispositivos pueden emitir partículas en menor cantidad que la biomasa, pero siguen siendo una fuente considerable, especialmente en entornos donde su uso es común [52].

Combustión de Gas: Cocinar con gas puede liberar partículas PM y otros compuestos orgánicos volátiles que reaccionan para formar PM secundarias [53].

Fritura y Asado: Estas actividades liberan aerosoles de grasa que pueden contribuir al nivel de PM en el aire interior [54].

Productos de Limpieza y Aerosoles: El uso de sprays y otros productos que contienen compuestos orgánicos volátiles puede contribuir a la formación de PM secundarias [55].

Actividades Comerciales: En entornos comerciales como restaurantes y talleres, las actividades específicas como la cocina a gran escala o las operaciones de maquinaria también pueden ser fuentes significativas de PM [56].

La Tabla 6 extraída de las fuentes previamente referenciadas permite asimilar la concentración PM de las fuentes de áreas comerciales y residenciales.

Tabla 6. Fuentes principales de emisión pm en areas residenciales y comerciales.

Fuente / Actividad	Nivel de PM2.5 (μg/m³)	Nivel de PM10 (μg/m³)	Duración de la Medición (horas)
Combustión de Biomasa	200 a 400	300 a 600	2 a 4 horas
Fritura y Asado	150 a 300	200 a 400	1 a 2 horas
Actividades Comerciales	50 a 100	60 a 120	24 horas
Cocina de Gas	25 a 75	30 a 90	1 a 2 horas
Calderas de Gas	10 a 20	15 a 30	24 horas
Productos de Limpieza	5 a 15	10 a 20	24 horas

Las actividades de construcción son una fuente significativa de emisión de partículas en suspensión. La generación de estas partículas en un entorno de construcción puede provenir de diversas actividades, tales como la excavación, el corte de materiales, la demolición y el transporte de materiales [57].

Excavación y Manipulación de Tierra: La excavación de la tierra y la manipulación de materiales granulares pueden causar la resuspensión de partículas en el aire, aumentando la concentración de PM10 y PM2.5 en la atmósfera cercana [58].

Corte de materiales: Operaciones como el corte de concreto o madera liberan partículas finas en el aire. Estas partículas pueden ser especialmente dañinas debido a la presencia de compuestos químicos tóxicos [59].

Demolición: Las actividades de demolición generan una gran cantidad de partículas de diversos tamaños, incluidas las categorías PM10 y PM2.5.

La Tabla 7 extraída de las fuentes previamente referenciadas permite asimilar la concentración PM de las fuentes de actividad en construcción.

Tabla 7. Emisión de partículas según actividad de construcción.

Actividad de Construcción	Emisión de PM10 (µg/m³)	Emisión de PM2.5 (µg/m³)	Tiempo de Medición (horas)
Excavación	120-160	50-80	1
Corte de Materiales	180-220	90-110	1
Demolición	300-400	100-200	2

Según algunos autores, las advecciones de polvo del Sahara (como así se llaman estos episodios) son relativamente comunes en España, oscilando su frecuencia de aparición entre el 9,6 % de los días en la región Noroeste de España y el 30,1 % en la región Sureste, pasando por el 18,2 % en la región Centro y el 22,4 % en las Islas Canarias según un estudio realizado en España con datos del periodo 2004-2009 [60]

En general, cuando se produce una intrusión de polvo de origen sahariano provoca un incremento en las concentraciones del material particulado, con un aumento estadísticamente significativo en las concentraciones de PM10 y PM2.5. En algunos casos pueden llegar a producirse incrementos del 110% para el caso de las PM10 y del 104 % para las PM2.5 [60]

La entrada de polvo procedente del Sáhara en nuestro país produce un incremento en los niveles de las PM en la atmósfera; este hecho, junto con el cambio de la composición de las PM suspendidas en el aire y el aumento en las concentraciones de otros contaminantes [61] trae consigo una modificación en el patrón de morbi-mortalidad asociado a los niveles de PM en el aire.

Los días con intrusiones de polvo sahariano la mortalidad asociada a las PM10 es mayor que en los que no se dan intrusiones [62].Otros trabajos realizados en Madrid tanto para población general como para mayores de 65 años [63] indican que, si bien los días sin intrusiones de polvo del Sahara son las concentraciones de PM2,5 (principal origen en el tráfico rodado), las que muestran una mayor asociación con la mortalidad diaria, durante los días con intrusión de polvo sahariano, esta asociación pasa a tener una mayor significación estadística para las PM10. Este comportamiento detectado en la mortalidad también se ha evidenciado en el patrón de los ingresos hospitalarios por urgencias. [64] [65]

7.2.2 Métodos de detección de partículas en suspensión

El método gravimétrico para la medición de partículas en el aire es uno de los más antiguos y establecidos en la comunidad científica (Figura 13). El principio fundamental de este método es relativamente simple: consiste en pasar un volumen específico de aire a través de un filtro de material absorbente, como papel de filtro o membranas de polímero, que atrapa las partículas en suspensión. Antes y después de este proceso, el filtro se pesa en condiciones controladas de temperatura y humedad para determinar la masa acumulada de partículas. La concentración de partículas se calcula dividiendo esta masa por el volumen total de aire que ha pasado a través del filtro durante el período de muestreo. Este resultado se suele expresar en microgramos por metro cúbico (µg/m3).

Calibración de Condiciones: Antes del muestreo, el filtro se coloca en una cámara de acondicionamiento para equilibrar su humedad y temperatura. Posteriormente, se pesa utilizando una balanza analítica de alta precisión para obtener la masa inicial (m_i).

Muestreo: El filtro se instala en un dispositivo de muestreo y se expone al ambiente que se desea monitorizar. Un flujo constante de aire, medido en metros cúbicos por minuto, se hace pasar a través del filtro durante un tiempo determinado (t).

Pesaje Final: Tras el muestreo, el filtro se vuelve a acondicionar y pesar para determinar la masa final (m_f).

Cálculo de la Concentración: La concentración de partículas (CC) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$C = \frac{m_f - m_i}{V} \quad (1)$$

donde V es el volumen total de aire muestreado, que se calcula como el producto del caudal de aire (Q) y el tiempo de muestreo (t):

$$V = Q\ x\ t \quad (2)$$

La concentración resultante se expresa en µg/m^3.

El costo del equipo gravimétrico es generalmente alto, variando desde varios miles de euros para los equipos más básicos hasta decenas de miles para sistemas más avanzados. Además, los costos operativos incluyen el análisis de laboratorio, que también puede ser costoso.

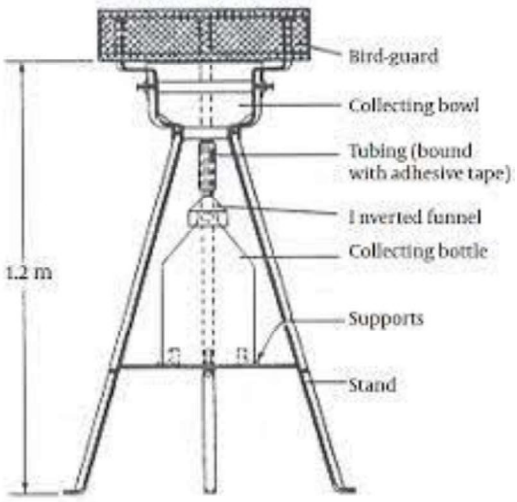


Figura 13. Partes de un equipo gravimétrico. https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTQZBe6dTqEH7ZODNLumk1PMbZQywcsTqzVU6REOzxUf5ZPsfadkyeVNeY_vD145r59-WY&usqp=CAU

El método electroestático se basa en la aplicación de un campo eléctrico para capturar partículas suspendidas en el aire (Figura 14). En este método, las partículas en suspensión se cargan eléctricamente, generalmente mediante un proceso de ionización, antes de pasarlas a través de un campo eléctrico. Una vez que las partículas están cargadas, se mueven hacia una superficie colectora bajo la influencia del campo eléctrico, donde quedan atrapadas. Al final del período de muestreo, el colector se examina para determinar la cantidad y tipo de partículas recolectadas, lo que a menudo se realiza mediante técnicas de microscopía electrónica o espectroscopia.

Su procedimiento de medición es el siguiente:

Ionización de Partículas: Un ionizador expone las partículas en suspensión a una fuente de ionización, generalmente un campo eléctrico de alta tensión, para cargarlas eléctricamente.

Captura en Campo Eléctrico: Las partículas cargadas son conducidas hacia un colector en presencia de un campo eléctrico. La fuerza del campo es lo suficientemente alta para mover las partículas hacia la superficie colectora, independientemente del flujo de aire.

Análisis de Partículas: Una vez recolectadas en la superficie, las partículas se pueden contar y analizar para determinar su tipo, tamaño y composición. Esto se puede hacer mediante microscopía electrónica, espectroscopía de energía dispersiva de rayos X o técnicas similares.

$$I = n \times q \tag{3}$$

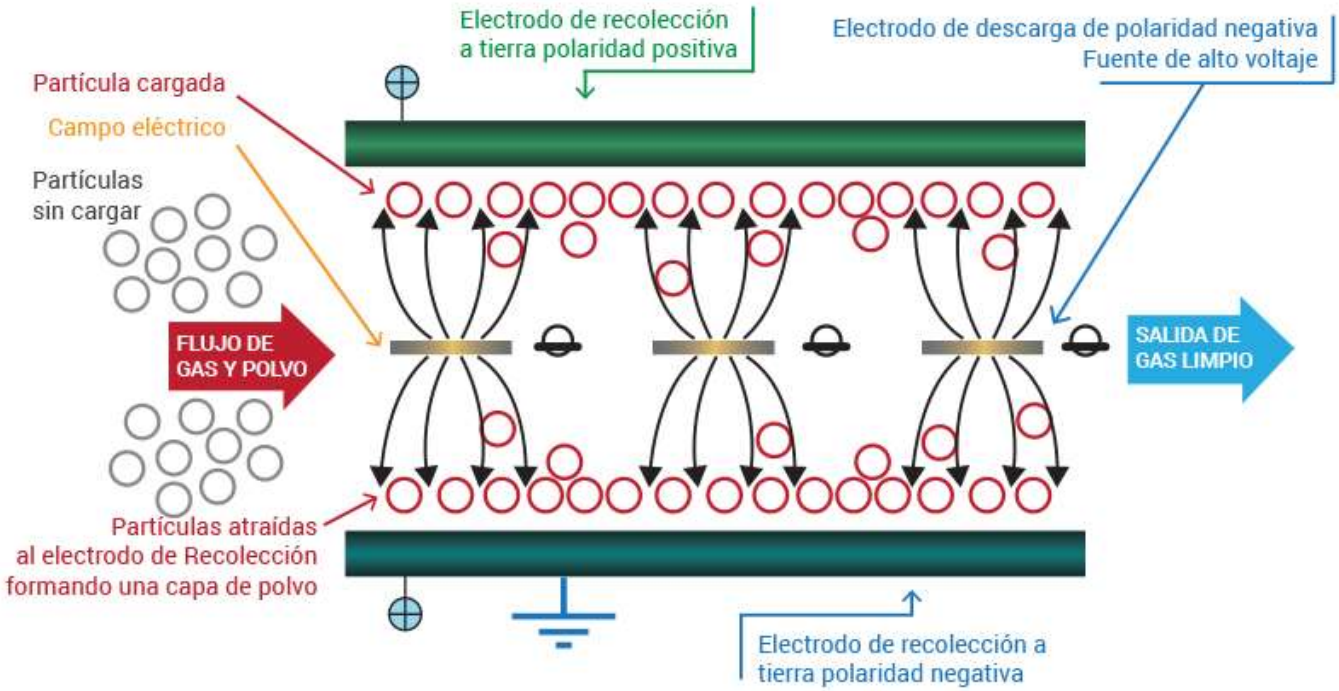


Figura 14. Funcionamiento de un filtro electroestático. https://www.grupoempresarialbonaire.com/wp-content/uploads/2017/11/BONAIRE_precipitador-electrostatico.png

El método óptico para la detección de partículas atmosféricas se basa en la interacción de la luz con las partículas en suspensión. Este enfoque utiliza diversas técnicas ópticas, como dispersión de luz, absorción o fluorescencia, para estimar la concentración y/o el tamaño de las partículas en el aire. Los dispositivos ópticos típicamente emplean un haz de luz, usualmente un láser, que se dirige a través de una muestra de aire (Figura 17).

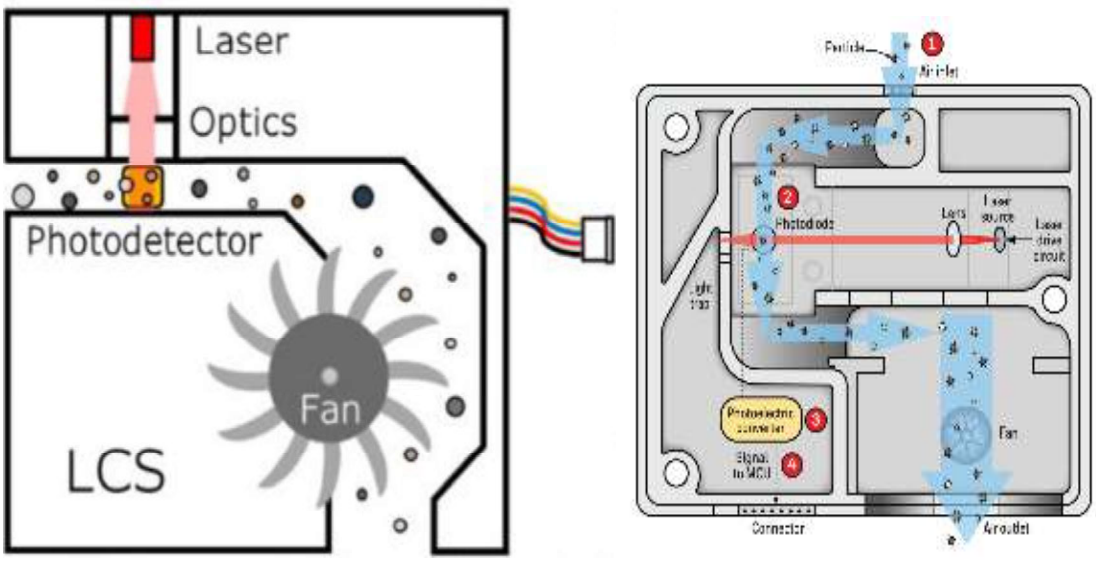


Figura 15, Interior sensor óptico general.
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10018765/bin/ez3c00030_0003.jpg

Su procedimiento de medición es el siguiente (Figura 16):

Generación de Luz: Una fuente de luz, generalmente un láser, emite un haz de luz coherente y monocromático.

Interacción Luz-Partícula: El haz de luz pasa a través de la muestra de aire que contiene las partículas en suspensión. Las partículas dispersan o absorben la luz en diversas direcciones, y esta interacción se mide mediante detectores ópticos.

Detección y Análisis: Los detectores ópticos capturan la luz dispersada o absorbida y convierten la señal en una forma que pueda ser cuantificada. A menudo, se emplean algoritmos específicos para analizar las señales y extraer parámetros como el tamaño y la concentración de las partículas.

El método óptico se ha vuelto cada vez más popular debido a su capacidad para proporcionar mediciones en tiempo real y su flexibilidad en términos de tipos de partículas que puede detectar.

Matemáticamente, la dispersión de la luz por una partícula puede describirse a través de la teoría de Mie, que es una solución generalizada de las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de luz en esferas homogéneas. La intensidad de la luz dispersada I(θ) está relacionada con el tamaño de la partícula a, la longitud de onda de la luz λ, y el ángulo de dispersión θ de la siguiente manera ([66]):

$$I(\theta) = \frac{2\pi^2 a^6}{\lambda^4}(m^2 - 1)^2 1 + \frac{\cos^2\theta}{2} \quad (4)$$

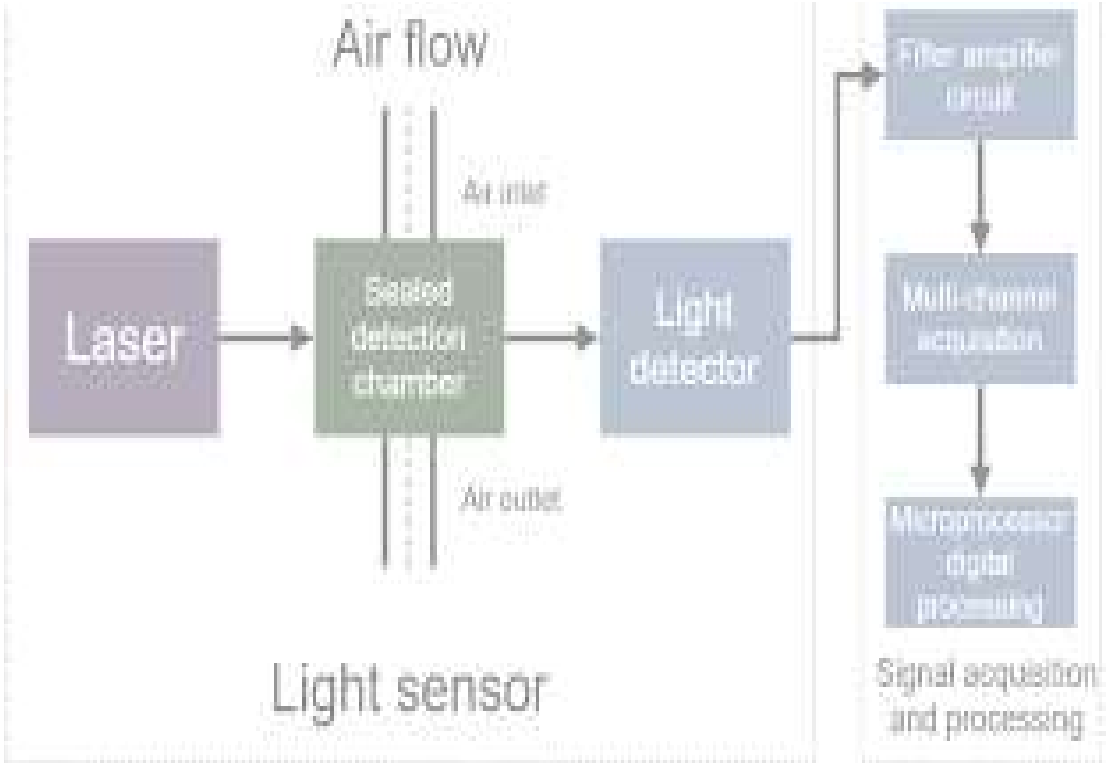


Figura 16. Funcionamiento interno de un sensor óptico. https://www.sos.sk/novinky/obr/obr2217_pbb4b86a67803.jpg

7.3 Hardware

7.3.1 Sensores

Para realizar el análisis de los sensores se ha realizado una tabla comparativa entre los principales sensores de bajo costo Tabla 8.

En la que se evalúa:

El rango de medición que es la extensión de concentraciones que el sensor es capaz de detectar. En un escenario ideal, se buscaría un sensor con un amplio rango de medición para abordar diferentes condiciones ambientales, desde bajas hasta altas concentraciones de partículas. Este parámetro es fundamental para determinar la versatilidad del sensor en diferentes aplicaciones.

La resolución que representa el menor cambio en la concentración de partículas que el sensor puede detectar de manera fiable. Una alta resolución (menores valores) es deseable cuando se requieren mediciones más detalladas y precisas, particularmente en ambientes con niveles de partículas relativamente bajos.

La exactitud que es una medida de cuán cercanas son las lecturas del sensor a la concentración real de partículas. Es comúnmente expresada en porcentaje y es crucial para evaluar la confiabilidad de los datos recopilados. Sensores con baja exactitud requieren calibración más frecuente para garantizar resultados fiables.

El tiempo de respuesta que es el intervalo de tiempo que tarda el sensor en detectar un cambio en la concentración de partículas y actualizar su salida. Tiempos de respuesta más rápidos son críticos en aplicaciones donde se requiere monitoreo en tiempo real

El consumo de energía, dado que muchos sensores se implementan en dispositivos portátiles o en ubicaciones remotas, el consumo de energía es un parámetro crítico. Sensores con bajo consumo de energía son más adecuados para aplicaciones a largo plazo y dispositivos alimentados por baterías.

La comunicación que describe el tipo de interfaz de comunicación que el sensor utiliza para transmitir datos. Las interfaces comunes incluyen UART e I2C. La elección de la interfaz afecta tanto la facilidad de integración del sensor con otros dispositivos como la velocidad de transmisión de datos.

La fuente de alimentación que es el voltaje necesario para alimentar el sensor. Este parámetro es relevante cuando se considera la integración del sensor con microcontroladores o sistemas de adquisición de datos

El costo del sensor es un parámetro significativo, especialmente en aplicaciones a gran escala donde el presupuesto puede ser una limitación.

La temperatura de operación, que especifica el rango de temperaturas en las cuales el sensor puede operar de manera fiable. Es particularmente importante en aplicaciones al aire libre donde el sensor estará expuesto a variaciones climáticas.

Tabla 8. Comparación hojas de datos entre sensores de bajo costo.

Modelo del Sensor	GP2Y1010AU0F	DSM501	SEN0177	SDS011	SEN0460	SEN54	SPS30	IPS-7100-1	Sensor NEXT PM	
Fabricante	Sharp	DFRobot	DFRobot	Inovafitness	DFRobot	SENSIRION	SENSIRION	IPS	Tera	Panasonic
Rango de Medición (µg/m³)	0-500	0-500	0-1000	0-999	1-1000	0-100	1-1000	0-1000	0-1000	0-999
Resolución (µg/m³)	1	1	1	0.3	0.3	0.01	0.1	0.1	0.1	0.5
Exactitud (%)	±15	±10	±10	±10	±5	±2	±5	±3	±1	±2
Tiempo de Respuesta (s)	0.5 to 1	6 to 12	1 to 2	1	1	1 to 4	1	0.5-1	0.5	2
Consumo de Energía (mW)	20-30	80-100	100-150	200-300	150-200	50-100	80-100	100-150	400-500	300-400
Comunicación	Analógico	Analógico	UART/Analógico	UART	I2C/UART	UART/I2C	UART/I2C	UART/I2C	UART	I2C/UART
Fuente de Alimentación (V)	5	5	3.3-5	5	5	3.3-5	5	5	5	5
Precio (€)	5 to 15	10 to 20	20-40	20-40	30-50	50-100	50-100	50-100	60-250	70-200
Temperatura de Operación (°C)	-10 to 65	-10 to 50	0 to 50	-20 to 50	-20 to 60	-10 to 60	-10 to 60	-20 to 50	-20 to 60	-10 to 60
Notas Adicionales	Bajo costo	Ampliamente utilizado	Multi-función	Muy popular	Baja deriva	Alta precisión	Alta resolución	Industrial	Calibrado	Alto rendimiento
Normativa de Calibración	---	---	NIEHS/NIOSH Guidelines	EN 16450:2017	TUV Certification	ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017	EN 12341:2014	ASTM D7391-09	CEN/TS 16976:2016	ISO 14644-1:2015
Dimensiones(mm)	46 x 30 x 17.6	59 x 45 x 22	62 x 32 x 20	71 x 70 x 23	45 x 32 x 20	50 x 40 x 30	41 x 41 x 12	120 x 80 x 50	100 x 60 x 40	88 x 45 x 37

Para un análisis de características técnicas de entre varios sensores consultar la Tabla 8. Se describe los sensores de mayor importancia tras la búsqueda en el mercado de sensores de medición de partículas de bajo costo.

El sensor SDS011 (Figura 17) es un sensor de bajo coste diseñado para la medición de partículas en suspensión en el aire, específicamente las partículas PM2.5 y PM10. Utiliza el método de dispersión de luz láser para detectar las partículas en un volumen de aire aspirado. Este tipo de sensor cuenta con un ventilador interno que atrae el aire hacia la cámara de medición, donde un diodo láser ilumina las partículas en suspensión. Cuando las partículas pasan a través del haz de luz, éste se dispersa y es capturado por un fotodiodo. La señal óptica resultante se convierte en una señal eléctrica que se procesa para calcular la concentración de partículas en el aire. (Ecuación 3)

Su principal ventaja radica en su bajo costo y su tamaño compacto, lo que lo hace idóneo para aplicaciones de monitorización ambiental distribuida y proyectos de ciencia ciudadana. Sin embargo, su precisión es generalmente menor que la de los instrumentos de referencia utilizados en estaciones de monitoreo ambiental profesionales. En términos de especificaciones, el SDS011 tiene un rango de medición de 0 a 999.9 µg/m³ para PM2.5 y PM10 con una resolución de 0.3 µg/m³. Su precisión está en el orden del ±15% y opera mejor en un rango de temperatura de -20 a +50 °C y en un rango de humedad del 0 al 70% sin condensación [67].

Es fundamental llevar a cabo la calibración del sensor para garantizar mediciones más precisas, especialmente cuando se planea comparar los datos con mediciones de sensores de alta gama o directrices gubernamentales. La calibración puede realizarse de manera experimental, mediante la comparación de las lecturas del sensor con un instrumento de referencia en condiciones controladas [68]. Además, se pueden aplicar algoritmos para corregir factores como la humedad y la temperatura, que pueden afectar la precisión del sensor.

En el ámbito de las telecomunicaciones, el sensor SDS011 puede ser fácilmente integrado en sistemas de monitoreo ambiental basados en microcontroladores como Arduino, y se pueden utilizar diversas técnicas de transmisión de datos para enviar la información recopilada a una estación central. Esto abre posibilidades para la creación de redes de sensores a gran escala que puedan proporcionar datos en tiempo real para el análisis y la toma de decisiones relacionadas con la calidad del aire [69].

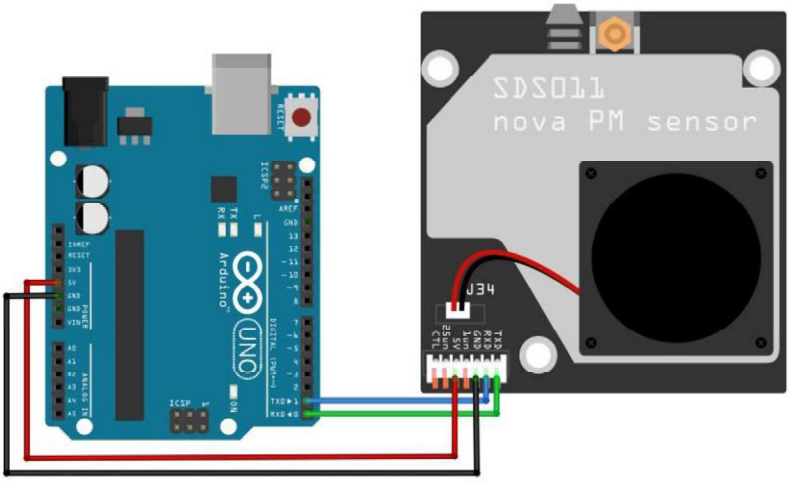


Figura 17. Conexión Nova PM sensor SDSD011 Arduino Uno. https://www.electroniclinic.com/wp-content/uploads/2021/10/dust-sensor-sds011-interfacing-with-arduino.jpg

El sensor SEN0177 (Figura 18) es otro sensor de bajo coste diseñado para medir partículas suspendidas en el aire, específicamente las partículas PM1.0, PM2.5 y PM10. Al igual que el SDS011, el SEN0177 emplea la técnica de dispersión de luz láser para medir la concentración de partículas en el aire. Este sensor está equipado con un ventilador que succiona el aire hacia una cámara donde se encuentra un diodo láser. Cuando las partículas pasan a través del haz de láser, la luz se dispersa y se capta mediante un fotodiodo. Posteriormente, la señal eléctrica resultante es procesada para determinar la concentración de partículas.

El SEN0177 suele tener un rango de medición para PM2.5 de 0 a 999 µg/m³ con una resolución de 1 µg/m³. Su exactitud varía, pero suele encontrarse dentro del margen del ±15%. El sensor opera eficientemente en un rango de temperatura de -10 a 60 °C y en un rango de humedad relativa del 0 al 95% [70].

Al igual que otros sensores de bajo coste, el SEN0177 ofrece la ventaja de ser compacto y relativamente económico, lo cual lo convierte en una opción viable para aplicaciones de monitoreo a gran escala y proyectos de ciencia ciudadana. Sin embargo, como cualquier otro sensor de bajo costo, su precisión es generalmente inferior a la de los equipos de monitoreo ambiental de nivel profesional y requiere de calibración para mejorar la precisión de las mediciones. Esta calibración puede realizarse mediante técnicas experimentales, comparando las lecturas del sensor con las de un instrumento de referencia bajo condiciones controladas [71].

En el contexto de las telecomunicaciones, el sensor SEN0177 puede ser fácilmente integrado con microcontroladores como Arduino para la recopilación de datos. Al igual que con el SDS011, las mediciones pueden transmitirse a una estación central para análisis y toma de decisiones utilizando diferentes protocolos de comunicación, lo que facilita la implementación de redes de sensores de monitoreo ambiental de gran envergadura [72].

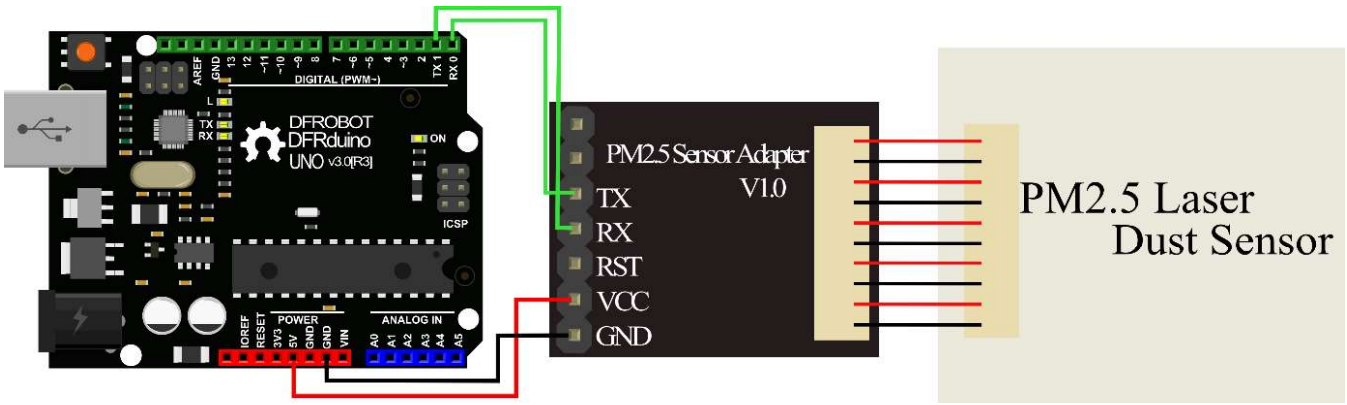


Figura 18. Conexión DFRobot SEN0177 Arduino Uno.
https://dfimg.dfrobot.com/nobody/wiki/7e59da17c0b06e6e36eddf738a09e7cb.png

El sensor DFRobot SEN460 (Figura 20) es un sensor de partículas en suspensión en el aire, diseñado para medir concentraciones de partículas PM1.0, PM2.5 y PM10. Este sensor utiliza el principio de dispersión de luz láser para realizar sus mediciones. La dispersión de la luz es inducida cuando las partículas pasan a través de un haz de luz láser en una cámara de medición. Un fotodiodo captura la luz dispersada, y la señal resultante se procesa para estimar la concentración de partículas en el aire en µg/m³.

El DFRobot SEN460 cuenta con un rango de medición que generalmente se extiende desde 0 hasta 999 µg/m³ para partículas PM1.0, PM2.5 y PM10, con una resolución de 1 µg/m³. En términos de precisión, los valores pueden variar, pero generalmente se encuentra dentro de un margen de error del ±10-15%. Este sensor también es operativo en un rango de temperatura de -10 a 60 °C y un rango de humedad relativa del 0 al 95% [73].

Al igual que otros sensores de bajo costo en su categoría, el SEN460 ofrece la ventaja de ser económico y compacto, lo cual es especialmente útil para aplicaciones de monitoreo ambiental a gran escala o proyectos de ciencia ciudadana. Sin embargo, debe someterse a calibración para mejorar la precisión de sus mediciones. Estos procesos de calibración pueden realizarse comparando sus lecturas con las de sensores de referencia en condiciones controladas [74].

En el contexto de la telecomunicación, el DFRobot SEN460 puede ser fácilmente integrado con plataformas de microcontroladores como Arduino. Su capacidad para conectarse a través de protocolos de comunicación estándar como UART facilita su inclusión en redes más grandes de sensores para monitoreo ambiental, permitiendo la transmisión de datos a estaciones centrales para su posterior análisis y acción [75].

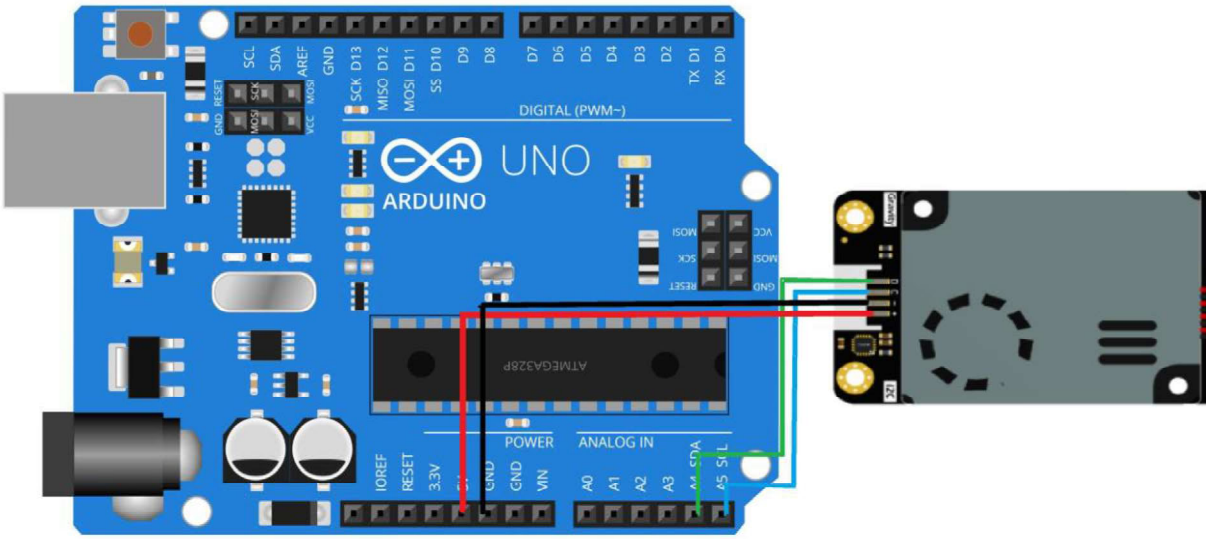


Figura 19. Conexión DFRobot SEN460 Arduino Uno.

El sensor Sensirion SEN54 es un dispositivo de medición de partículas en suspensión en el aire diseñado para detectar concentraciones de PM1.0, PM2.5 y PM10. Este sensor emplea la tecnología de dispersión de luz láser para estimar la concentración de partículas. Un haz de luz láser ilumina las partículas que fluyen a través de una cámara de muestreo gracias a un ventilador incorporado. La luz dispersada por las partículas es recogida por un fotodiodo, y la señal resultante se procesa electrónicamente para determinar la concentración de partículas en µg/m³.

El SEN54 típicamente tiene un rango de medición que va desde 0 hasta 1000 µg/m³ con una resolución de 1 µg/m³ para partículas PM1.0, PM2.5 y PM10. La precisión suele estar dentro de un margen del ±10% y es capaz de operar en un rango de temperatura de -10 a 60 °C y un rango de humedad relativa de 0 a 95% [76].

Una de las ventajas del SEN54 sobre otros sensores de bajo costo es su capacidad para realizar ajustes en tiempo real en función de las condiciones ambientales, lo que mejora la precisión de las mediciones. Sin embargo, al igual que otros sensores de su tipo, se recomienda una calibración regular para asegurar la exactitud de los datos. Esta calibración puede realizarse mediante comparación con un sensor de referencia en condiciones ambientales controladas [77].

Desde la perspectiva de las telecomunicaciones, el Sensirion SEN54 es fácilmente integrable con plataformas de microcontroladores como Arduino y es compatible con diferentes protocolos de comunicación, como UART y I2C. Esta versatilidad lo convierte en una opción viable para la implementación en redes de sensores de monitoreo ambiental a gran escala, permitiendo la transmisión de datos para análisis y toma de decisiones en tiempo real [78].

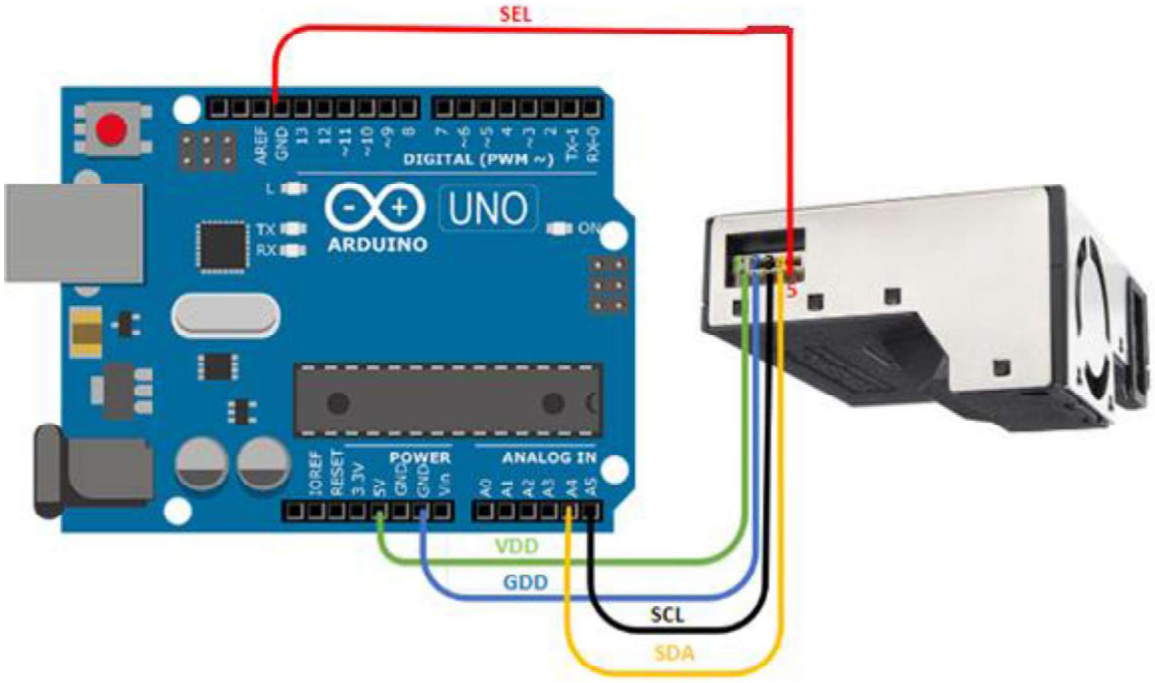


Figura 20. Conexión Sensirion SEN54 con Arduino One.

El sensor Sensirion SPS30 (Figura 21) es un sensor de partículas en suspensión en el aire de alta calidad diseñado para medir concentraciones de PM1.0, PM2.5, PM4.0 y PM10. Este sensor emplea la tecnología de dispersión de luz láser para estimar la concentración de partículas en el aire. Un haz de luz láser incide sobre las partículas que son arrastradas a través de una cámara de medición por un ventilador integrado. La luz dispersada por las partículas se detecta mediante un fotodiodo, y la señal resultante se procesa para determinar la concentración de partículas en µg/m³. El ángulo y la intensidad de la luz dispersada se utilizan para estimar el tamaño y la concentración de las partículas. Empleando algoritmos basados en la teoría de Mie para interpretar la intensidad de la luz dispersada y convertirla en concentraciones de partículas de distintos tamaños, desde PM1 hasta PM10.

El SPS30 posee un rango de medición que generalmente se extiende desde 0 hasta 1000 µg/m³ para las distintas fracciones de partículas, con una resolución de 1 µg/m³. Su precisión se sitúa en un margen de error del ±10%, lo cual es considerado bastante fiable para un sensor de bajo coste. Este sensor opera eficientemente en un rango de temperatura de -10 a 60 °C y un rango de humedad relativa del 0 al 95% [79].

Una característica distintiva del Sensirion SPS30 es su capacidad para proporcionar una estimación del número de partículas en distintos tamaños, además de la concentración de masa. Esto se logra mediante un algoritmo avanzado que analiza la dispersión de luz en varios ángulos, lo que le confiere una mayor precisión en comparación con sensores de bajo costo más convencionales [80]. Su capacidad para realizar también una estimación de la composición de las partículas (orgánicas, inorgánicas), utilizando variaciones en las características de dispersión de la luz. Adicionalmente, este sensor tiene funciones de compensación para variables ambientales como la humedad y la temperatura, lo cual mejora la fiabilidad de las mediciones en diferentes condiciones ambientales.

Desde la perspectiva de las telecomunicaciones, el SPS30 ofrece una variedad de opciones de interfaz, incluidos los protocolos UART e I2C, facilitando su integración con microcontroladores como Arduino. Este sensor es una elección popular para implementaciones en redes de monitoreo ambiental, especialmente dado su equilibrio entre costo, precisión y versatilidad de comunicación [81].

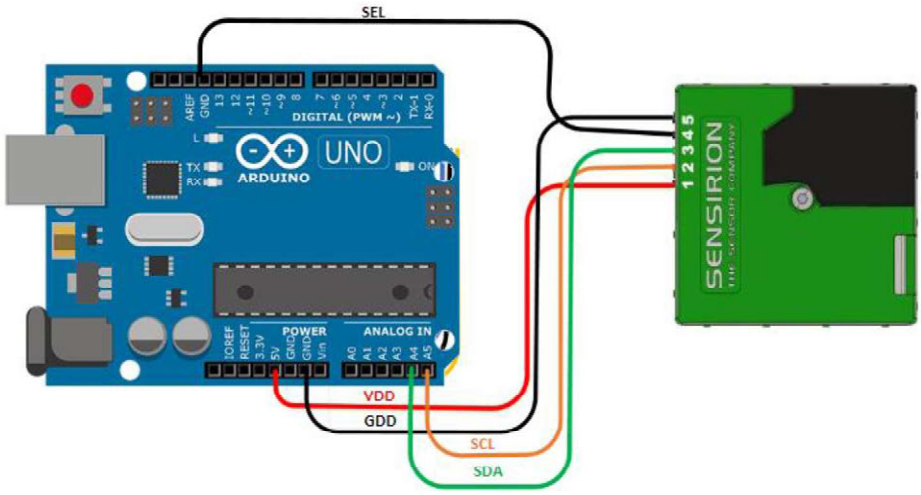


Figura 21. Conexión Sensirion SPS30 con Arduino Uno.

El mecanismo de autolimpieza del que dispone el SPS30 es una característica de gran valor añadido, diseñada para mantener la precisión de las mediciones a lo largo del tiempo mediante la minimización de la acumulación de partículas y polvo en el sensor. Este sistema de limpieza utiliza un ventilador interno que invierte su dirección de flujo de aire durante un corto periodo de tiempo para eliminar las partículas que se hayan adherido a las superficies internas del sensor.

El sensor TERA Next-PM (Figura 22) es un dispositivo de medición de partículas en suspensión en el aire diseñado para monitorizar concentraciones de PM1.0, PM2.5, PM4.0 y PM10. Este sensor utiliza la técnica de dispersión de luz láser para estimar la concentración de partículas. Un haz de luz láser ilumina las partículas que fluyen a través de una cámara de medición, gracias a un ventilador incorporado. Un fotodiodo recoge la luz dispersada por las partículas, y la señal resultante es procesada para estimar la concentración en µg/m³.

El TERA Next-PM típicamente opera dentro de un rango de medición que va desde 0 hasta 1000 µg/m³, con una resolución de 1 µg/m³. En términos de precisión, el dispositivo tiene un margen de error del ±10%, que es comparable con otros sensores de bajo costo en el mercado. Funciona eficientemente en un rango de temperatura de -10 a 60 °C y un rango de humedad relativa de 0 a 95% [82].

Una de las ventajas del TERA Next-PM es su capacidad para proporcionar estimaciones tanto de la concentración de masa como del número de partículas en diversos tamaños de partículas, lo cual se logra mediante un algoritmo avanzado que analiza la dispersión de la luz. Esto le confiere una ventaja en términos de precisión y versatilidad sobre otros sensores de bajo costo [83].

Desde la perspectiva de telecomunicaciones, el TERA Next-PM ofrece flexibilidad en términos de comunicación, ya que soporta múltiples protocolos como UART e I2C. Esto facilita su integración con sistemas de microcontroladores como Arduino y su implementación en redes de sensores de monitoreo ambiental a gran escala [84].

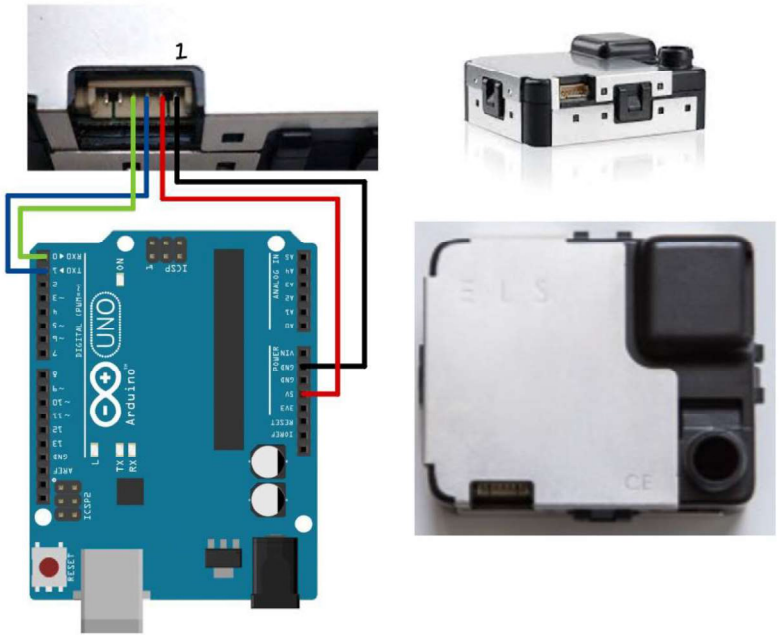


Figura 22. Conexión NextPM a Arduino Uno.

7.3.2 Microcontroladores

Los microcontroladores juegan un papel crítico en el mundo de la automatización y control de sistemas embebidos. Estos dispositivos de bajo coste, alta eficiencia y bajo consumo de energía, ofrecen una plataforma ideal para el desarrollo de sistemas de monitorización ambiental. Un microcontrolador integra las funciones de un procesador de CPU, memoria y E/S en un solo chip, lo que lo convierte en una solución compacta y económica para aplicaciones que requieren procesamiento de datos, control y capacidad de interfaz en tiempo real [85].

Una de las mayores ventajas de los microcontroladores es su flexibilidad para adaptarse a diferentes aplicaciones. Esto es especialmente útil en el campo de la monitorización ambiental donde las necesidades pueden variar ampliamente dependiendo del parámetro a medir, como temperatura, humedad, nivel de partículas en el aire, etc. Su diseño modular permite una fácil escalabilidad, lo que significa que se pueden agregar o eliminar funciones sin requerir cambios significativos en el hardware o software existente [86].

Dada la importancia de la sostenibilidad en proyectos de monitorización ambiental, el bajo consumo energético de los microcontroladores es otra característica crucial. Estos dispositivos pueden operar con baterías durante largos períodos de tiempo, lo que los hace idóneos para aplicaciones en ubicaciones remotas o de difícil acceso.

En el contexto de este proyecto, se emplea un microcontrolador Arduino Uno para la monitorización de niveles de inmisión de partículas en el ambiente. Este microcontrolador se encarga de recibir los datos generados por varios sensores de partículas de bajo costo, procesar dicha información y almacenarla en una tarjeta SD para su posterior análisis [87].

El Arduino Uno se utiliza para realizar una serie de tareas críticas. Primero, recoge datos en tiempo real de los sensores de partículas conectados. Luego, realiza cálculos matemáticos para convertir las señales analógicas en unidades físicas que son almacenadas en la tarjeta SD [88]. Esta etapa es esencial para la veracidad y precisión de los datos recolectados.

El microcontrolador también actúa como un intermediario entre los sensores y cualquier dispositivo de visualización o análisis de datos, permitiendo una comunicación efectiva y fiable entre diferentes partes del sistema. Permitiendo la evaluación en tiempo real de la calidad del aire y la toma de medidas correctivas en caso de que se detecten niveles peligrosos de partículas [89].

Arduino Uno es una placa de microcontrolador de código abierto basada en el microcontrolador ATmega328P. Desarrollada por Arduino.cc, esta placa ha sido diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios [90].

El corazón de la placa Arduino Uno es el microcontrolador ATmega328P, que opera a una frecuencia de reloj de 16 MHz. Este microcontrolador cuenta con 32 kB de memoria flash, 2 kB de SRAM y 1 kB de EEPROM [91].

El Arduino Uno está equipado con 14 pines de E/S digitales, de los cuales 6 pueden ser utilizados como salidas PWM (modulación por ancho de pulso), y 6 pines de entrada analógica [92].

La placa puede ser alimentada a través del puerto USB o mediante una fuente de alimentación externa que varía entre 7 y 12 voltios. En cuanto a la conectividad, el Arduino Uno incluye una serie de interfaces como UART, SPI e I2C que permiten la comunicación con otros dispositivos y módulos [93] (Figura 23).

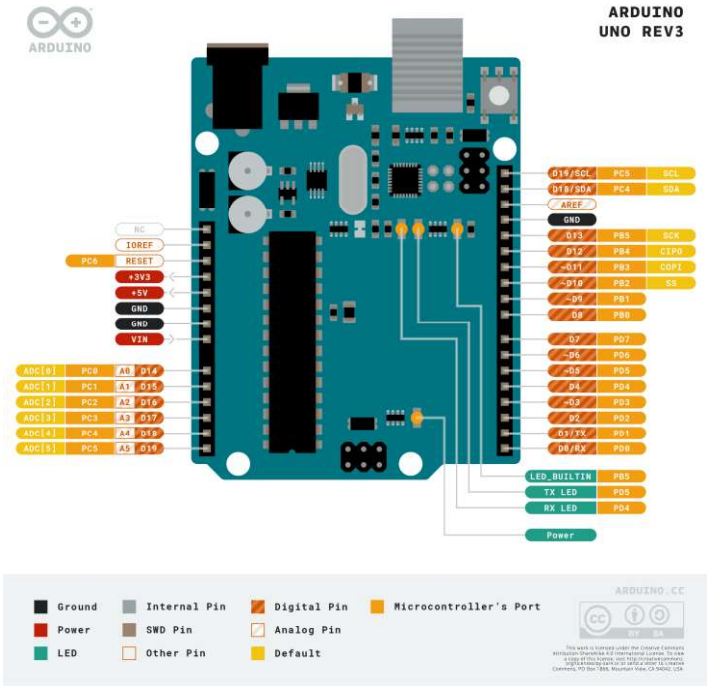


Figura 23. PinOut Arduino Uno.
https://docs.arduino.cc/static/6ec5e4c2a6c0e9e46389d4f6dc924073/2f891/Pinout-UNOrev3_latest.png

El modelo Raspberry Pi 4, cuenta con un procesador ARM Cortex-A72 de cuatro núcleos que opera a 1.5 GHz, lo que representa un aumento significativo en el rendimiento en comparación con modelos anteriores. El dispositivo ofrece variantes con 2 GB, 4 GB y hasta 8 GB de RAM LPDDR4-3200 [94].

En términos de conectividad, el Raspberry Pi 4 ofrece dos puertos USB 3.0, dos puertos USB 2.0, un puerto Ethernet Gigabit y conectividad Wi-Fi 802.11ac. Además, cuenta con 40 pines GPIO (General Purpose Input/Output) para la conexión con diversos tipos de sensores y actuadores [95] (Figura 24).

El dispositivo se alimenta a través de un puerto USB-C y admite tarjetas microSD para el almacenamiento del sistema operativo y los datos. También existe la opción de utilizar un disco duro o SSD externo a través del puerto USB 3.0 para almacenamiento adicional [96].

Con su potente CPU y mayor RAM, el Raspberry Pi podría manejar algoritmos más complejos para el procesamiento y análisis de datos en tiempo real [97].

La inclusión de Ethernet Gigabit y Wi-Fi 802.11ac lo hace apto para proyectos que requieran alta velocidad de transferencia de datos o capacidades de red más robustas [98].

El Raspberry Pi puede ejecutar una variedad de sistemas operativos y entornos de desarrollo, lo que lo hace más versátil para distintas aplicaciones de monitorización ambiental [99].

Aunque el Raspberry Pi no se emplea en este proyecto específico de monitorización ambiental de niveles de inmisión de partículas, su arquitectura y capacidades lo convierten en una plataforma potencialmente útil para aplicaciones de monitoreo más complejas o de mayor escala.

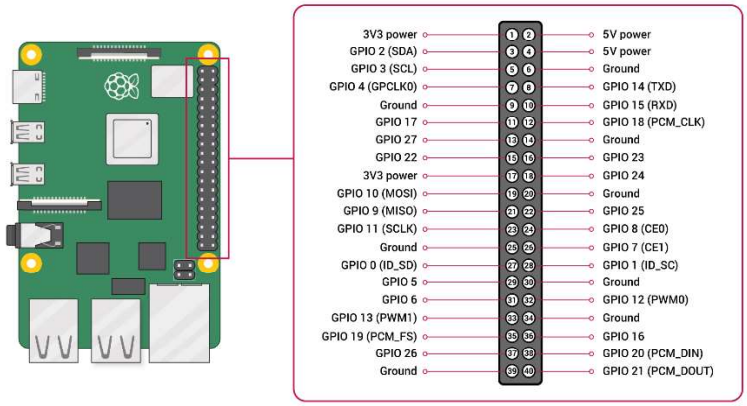


Figura 24. Raspberry Pi PinOut. https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/images/GPIO-Pinout-Diagram-2.png

El ESP8266 es un chip de bajo costo que ofrece capacidades de conexión Wi-Fi y una CPU suficientemente potente para aplicaciones de Internet de las cosas (IoT) [100]. Este chip se ha convertido en una opción popular para proyectos que requieren conectividad inalámbrica a Internet debido a su bajo costo y versatilidad.

El ESP8266 incorpora un microprocesador Tensilica L106 de 32 bits que opera a 80 MHz, con la opción de overclocking hasta 160 MHz. El chip incluye también hasta 4 MB de memoria flash externa y 160 kB de SRAM [101].

Una de las características más notables del ESP8266 es su capacidad de conexión Wi-Fi 802.11 b/g/n integrada en el chip, lo que elimina la necesidad de un módulo Wi-Fi externo. También proporciona diversas opciones para la conexión a redes, incluyendo estación, punto de acceso y modos duales [102].

El ESP8266 ofrece hasta 17 pines de E/S digitales que pueden funcionar como entradas o salidas. Algunos de estos pines pueden ser configurados para funciones especiales como UART, SPI e I2C [103] (Figura 25).

En proyectos de monitorización ambiental, la conectividad Wi-Fi del ESP8266 podría utilizarse para enviar datos en tiempo real a una base de datos en la nube o a un servidor local [104].

El ESP8266 es conocido por su bajo consumo de energía, especialmente en modo de suspensión, lo que lo hace ideal para aplicaciones de monitoreo que requieren largos períodos de operación sin intervención [105].

Este chip puede ser programado utilizando el entorno de desarrollo de Arduino, lo que facilita la integración con sensores y otros módulos compatibles con Arduino [106].

El ESP8266 se presenta como una opción atractiva para proyectos que requieran tanto capacidad de procesamiento como conectividad Wi-Fi en un solo chip. Su bajo costo y flexibilidad de programación lo hacen ideal para aplicaciones de monitoreo ambiental que requieren conectividad en tiempo real.

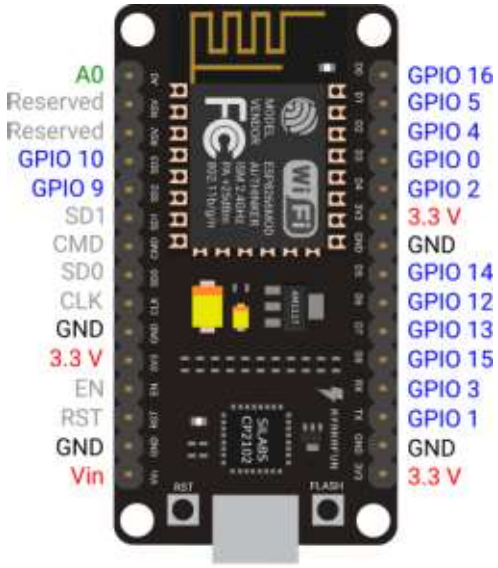


Figura 25. ESP8266 PinOut. https://i2.wp.com/mechatronicsblog.com/wp-content/uploads/2019/02/NodeMCU_V2_v2.png?fit=252%2C300&ssl=1

Se ha realizado la Tabla 9, comparativa entre microcontroladores:

Tabla 9. Comparativa entre microcontroladores extraído de las especificaciones técnicas.

Característica	Arduino Uno	ESP8266	Raspberry Pi Pico
Arquitectura	ATmega328P (8-bit)	Tensilica Xtensa (32-bit)	ARM Cortex-M0+ (32-bit)
Velocidad de reloj	16 MHz	Hasta 160 MHz	Hasta 133 MHz
Entradas/Salidas	14 pines digitales, 6 analógicas	17 pines digitales	26 pines digitales
Alimentación	5V	3.3V	3.3V
Comunicación	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C, WiFi	UART, SPI, I2C, USB
Costo	Medio	Bajo	Bajo
Comunidad	Amplia	Amplia	Creciente
Facilidad de uso	Alta	Media	Media
Dimensiones (mm)	68.6 x 53.4	85 x 56	24 x 16

7.3.3 Almacenamiento

Para el almacenamiento de los datos obtenidos se presentan varías alternativas, como el uso de tarjetas SD, de la EEPROM interna de Arduino o el uso de la nube.

Las tarjetas Secure Digital (SD) (Figura 26) son un tipo de memoria no volátil que permite un fácil almacenamiento y transferencia de datos. Estas tarjetas son muy utilizadas en dispositivos de bajo consumo como cámaras, smartphones y, por supuesto, microcontroladores como Arduino. Las tarjetas SD pueden variar en capacidad, desde unos pocos megabytes hasta varios gigabytes. Además, presentan una alta durabilidad y resistencia a factores ambientales, lo que las convierte en una opción robusta para proyectos de monitorización ambiental.

Las tarjetas SD pueden conectarse a un Arduino mediante una interfaz SPI (Serial Peripheral Interface), y la biblioteca SD.h en Arduino facilita la lectura y escritura de datos en la tarjeta. Esta biblioteca soporta tanto el sistema de archivos FAT16 como FAT32, permitiendo una compatibilidad amplia.

Las tarjetas SD vienen en diferentes clases de velocidad, que varían desde Clase 2 hasta Clase 10, donde un número más alto indica una mayor velocidad de escritura. Para aplicaciones que requieren el registro de una gran cantidad de datos en tiempo real, es crucial elegir una tarjeta de alta velocidad para evitar cuellos de botella en el sistema de almacenamiento

Una ventaja clave de las tarjetas SD es que son extraíbles, lo que facilita la transferencia de datos a un ordenador para su posterior análisis. Sin embargo, debido a la latencia en el acceso a los datos y la limitación en el número de ciclos de escritura/lectura, no son la opción más rápida ni la más duradera a largo plazo.

Las tarjetas SD, aunque efectivas, presentan limitaciones en términos de velocidad de escritura y número de ciclos de escritura-lectura, lo que podría resultar en un desgaste a lo largo del tiempo.

Figura 26. Tarjeta SD de 32 Gb. https://alexmovilex.com/wp-content/uploads/2022/03/5766.jpg

La EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory) (Figura 27) es una forma de memoria no volátil que permite el almacenamiento de pequeñas cantidades de datos de manera persistente. El Arduino Uno, que se está utilizando en este proyecto, viene con 1 KB de memoria EEPROM. Esta memoria es particularmente útil para almacenar configuraciones o datos que deben sobrevivir a los reinicios del sistema.

Utilizar la EEPROM interna elimina la necesidad de hardware adicional, pero tiene la desventaja de ser limitada en tamaño y en ciclos de escritura (alrededor de 100,000 ciclos de escritura/lectura). Además, acceder a la EEPROM es generalmente más lento que acceder a la memoria RAM, lo que podría ser una limitación en aplicaciones que requieren tiempos de respuesta rápidos.

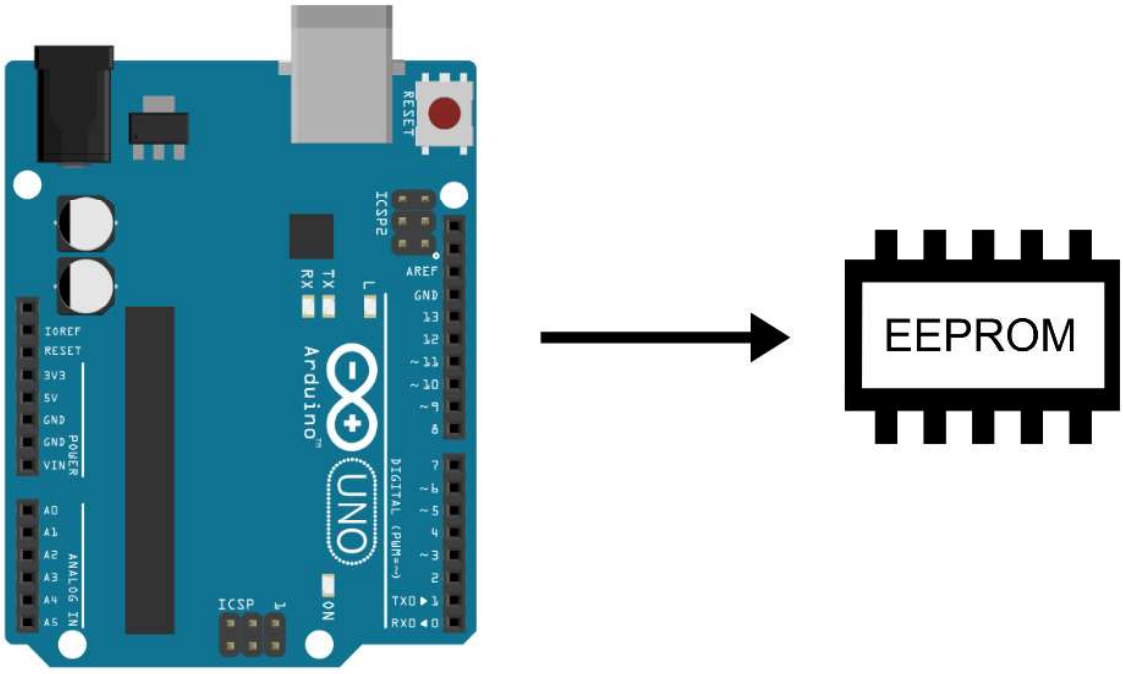


Figura 27. EEPROM Arduino Uno. https://www.aranacorp.com/wp-content/uploads/arduino-uno-eeprom.png

El almacenamiento en la nube ofrece la capacidad de guardar grandes volúmenes de datos en servidores remotos, facilitando su acceso y análisis desde cualquier lugar con conexión a Internet. Este tipo de almacenamiento es especialmente útil para aplicaciones de IoT (Internet de las Cosas), donde los datos generados por múltiples sensores podrían ser analizados en tiempo real o casi en tiempo real.

Sin embargo, implementar almacenamiento en la nube requiere una conexión constante y fiable a Internet, lo que podría ser un desafío en entornos remotos o rurales. Además, la seguridad y la privacidad de los datos almacenados en la nube son preocupaciones que deben abordarse cuidadosamente.

La siguiente Tabla 10. Comparativa entre sistemas de almacenaje. muestra una comparativa técnica entre los sistemas de almacenamiento:

Tabla 10. Comparativa entre sistemas de almacenaje.

Característica	Tarjeta SD	Almacenamiento en la Nube	Memoria EEPROM incorporada
Capacidad	Alta (hasta GB)	Prácticamente ilimitada	Muy limitada (1KB en Arduino)
Velocidad	Alta (dependiendo del tipo)	Varía (depende de la conexión)	Media
Accesibilidad	Local	Remota	Local
Durabilidad	Variable	Alta	Media (limitada por ciclos)
Escalabilidad	Limitada	Alta	No escalable
Portabilidad	Alta	Media (necesita conexión)	Alta
Seguridad	Media (física)	Variable (depende del servicio)	Alta (local)
Coste	Único (pago inicial)	Recurrente	Incorporado en Arduino
Requisitos adicionales	Lector de tarjetas SD	Conexión a Internet	---

7.3.4 Sensores de referencia

Se han seleccionado dos sensores de referencia específicos para llevar a cabo la calibración: el RS PRO RS-9680 y el Temtop M2000 2ª Nd. Ambos dispositivos se han utilizado como puntos de referencia para la calibración de los sensores de bajo costo integrados en el sistema de monitorización ambiental desarrollado sobre una plataforma Arduino Uno con almacenamiento de datos en tarjeta SD.

El objetivo de este apartado es proporcionar un análisis comparativo riguroso de estos dos sensores de referencia, evaluando su rendimiento en función de métricas como el rango de medición, la resolución, la temperatura y la humedad de operación, la tasa de muestreo, la capacidad de almacenamiento de datos, las dimensiones, el peso y el costo. Esta evaluación facilitará una comprensión profunda de las ventajas y limitaciones de cada sensor, permitiendo así optimizar su aplicación en la calibración de sistemas de monitorización de calidad del aire de bajo costo.

El sensor Temtop M2000 2ª Nd (Figura 28) es un dispositivo avanzado para la detección y cuantificación de partículas en suspensión en la atmósfera.

Emplea el método de dispersión de luz láser para medir la concentración de partículas en el aire. Al igual que el RS PRO RS-9680, cuando las partículas atraviesan el haz de láser del sensor, la luz se dispersa en diferentes ángulos y patrones. Un fotodetector incorporado capta esta luz dispersada y la transforma en señales eléctricas, que posteriormente son procesadas por un microcontrolador para determinar el tamaño y la concentración de las partícula

Está diseñado para medir partículas con diámetros que varían desde 0.3 hasta 10 µm, con una resolución de 0.1 µm. Su sensibilidad es tal que puede detectar concentraciones de partículas en el rango de 0-500 µg/m³. Esta capacidad de medición le permite ser aplicable tanto en entornos interiores como exteriores para monitorear partículas como PM2.5 y PM10.

Tiene un error relativo de medición menor al 5%, lo que lo hace altamente fiable para aplicaciones donde la precisión es crítica. Su coeficiente de variación está por debajo del 3%.

Es compatible con Arduino Uno y puede conectarse a través de una interfaz UART o I2C. Esta flexibilidad lo convierte en una opción viable para sistemas de monitorización ambiental basados en microcontroladores de bajo costo.

La normativa de calibración seguida **EN 12341:2014.** Se centra en la medición gravimétrica para determinar la concentración de PM10 o PM2.5 en el aire ambiente. Es una norma europea que a menudo se utiliza en estudios de monitorización ambiental a largo plazo.

Figura 28. Rangos de medida Temtop M2000 2ª Nd.

El RS PRO RS-9680 (Figura 29) es un sensor de partículas en suspensión diseñado para aplicaciones de monitorización ambiental y calidad del aire en interiores. Es producido por RS Components y destaca por su alta precisión y fiabilidad en una variedad de condiciones ambientales. El sensor utiliza un método de dispersión de luz láser para contar y clasificar partículas en diferentes categorías de tamaño, desde 0.5 µm hasta 100 µm.

Emplea el método de dispersión de luz láser para determinar la concentración y tamaño de las partículas en suspensión. Cuando las partículas pasan a través del haz de láser, dispersan la luz en diferentes direcciones. Un fotodetector recoge la luz dispersada y la convierte en señales eléctricas, que luego son procesadas para estimar la concentración de partículas en el aire.

La normativa de calibración seguida es la **ISO 21501-4:2018**. Esta norma establece los requisitos para el desempeño y calibración de los monitores de partículas en aire (aerosoles). Es especialmente relevante para los dispositivos que emplean técnicas ópticas para la detección de partículas.

Figura 29. Sensor RS PRO-RS-9680.

Se ha realizado la Tabla 11, comparativa entre los equipos de referencia:

Tabla 11. Comparativa equipos de referencia y SDS011.

Características	Temtop M2000 2ª Nd	RS PRO RS-9680	SDS011
Rango de Medición (µm)	0.3 - 10	0.5 - 100	0.3 - 10
Resolución (µm)	0.1	0.5	0.1
Concentración Máxima (µg/m³)	0 - 500	0 - 1000	0 - 999
Error Relativo (%)	< 5	< 7	< 10
Coeficiente de Variación (%)	< 3	< 5	< 4
Interfaz	UART, I2C	UART, RS-485	UART
Compatibilidad con Arduino Uno	Sí	Sí	Sí
Vida Útil (años)	2 to 3	3 to 4	1 to 2
Consumo de Energía (mW)	0 - 30	50 - 70	30 - 40
Precio (€)	90 - 110	120 - 150	25 - 40
Temperatura de Operación (°C)	-10 a 50	-10 a 50	-20 a 50
Humedad de Operación (%)	0 - 95	0 - 85	0 - 70
Tasa de Muestreo (Hz)	45200	45047	1
Capacidad de Almacenamiento	Hasta 10,000	N/D	No
Dimensiones (mm)	120 x 80 x 40	100 x 60 x 30	71 x 70 x 23
Sistema de Almacenamiento de Datos	Sí	No	No
Norma de Calibración	EN 12341:20142	ISO 21501-4:20181	EN 16450:2017
Requerimiento de Calibración	Periódica	Anual	Periódica

7.3.5 Sensores de temperatura

Se describe en detalle la tecnología que respalda la FLIR E60bx y el sensor DTH22, sus características clave y sus especificaciones técnicas. Además, se explora la matemática y la física que sustentan su funcionamiento, proporcionando una base sólida para su aplicación en este proyecto. Posteriormente, se justifica su utilidad en el contexto de la monitorización ambiental, enfocándose en cómo la tecnología termográfica puede complementar y potenciar las capacidades de los sensores de partículas de bajo costo ya implementados en este estudio.

Al abordar estos aspectos, se pretende ofrecer un argumento sólido y fundamentado para la inclusión de la cámara termográfica FLIR E60bx en el diseño experimental del proyecto, subrayando su contribución a la recopilación de datos más completos, precisos y confiables para la monitorización ambiental de niveles de inmisión de partículas.

La cámara termográfica FLIR E60bx es un dispositivo especializado diseñado para detectar y medir patrones de radiación infrarroja emitida por objetos. El dispositivo es especialmente relevante en aplicaciones que requieren un análisis preciso y detallado de la distribución de temperatura en una escena, como en la inspección de edificios, sistemas eléctricos y mecánicos, y en estudios ambientales. Con una gama de características avanzadas como alta resolución, sensibilidad térmica superior y una serie de opciones de conectividad, la FLIR E60bx establece un estándar significativo en el ámbito de las cámaras termográficas [107] [108].

La cámara termográfica FLIR E60bx opera capturando la radiación infrarroja de un objeto o escena siguiendo la la Ley de Planck de radiación térmica, que describe cómo los objetos emiten radiación electromagnética en función de su temperatura:

La cámara termográfica FLIR E60bx opera capturando la radiación infrarroja de un objeto o escena siguiendo la la Ley de Planck de radiación térmica, que describe cómo los objetos emiten radiación electromagnética en función de su temperatura:

$$I(\boldsymbol{\lambda}, \mathrm{T}) = \frac{2\boldsymbol{\lambda}\pi \mathrm{hc}^2}{\boldsymbol{\lambda}^5} * \frac{1}{e^{\frac{hc}{\boldsymbol{\lambda}\mathbf{kT}}-1}} \quad (5)$$

donde I es la irradiancia espectral, λ es la longitud de onda (Figura 30), T es la temperatura del cuerpo negro, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, y k es la constante de Boltzmann [109].

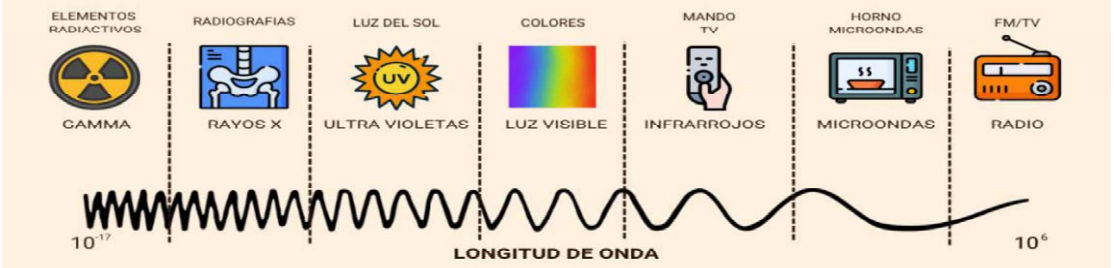


Figura 30. Espectro electromagnético. https://www.apliter.com/wp-content/uploads/2022/10/Proves-12-1024x438.png

A través de un detector de microbolómetro, que genera una imagen térmica a partir de las diferencias en la radiación emitida [110]. Convierte la radiación infrarroja capturada en una señal eléctrica, generalmente a través del efecto de resistencia térmica. La relación entre el cambio en la resistencia ΔR y el cambio en la temperatura ΔT se describe generalmente por el coeficiente de temperatura de resistencia (TCR):

$$\Delta R = TCR \text{ x } R_0 \, x \, \Delta T \quad (6)$$

donde R0 es la resistencia a temperatura ambiente y TCR es el coeficiente de temperatura de resistencia [111].

Esta imagen térmica es entonces calibrada y analizada utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes para extraer mediciones de temperatura precisas en varios puntos de la imagen [112]. Se utiliza un cuerpo negro, que es un emisor ideal de radiación térmica. La ecuación de Stefan-Boltzmann relaciona la potencia total P emitida por un cuerpo negro con su temperatura T:

$$P = \sigma A T^4 \quad (7)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y A es el área superficial del cuerpo negro [113].

La fusión de imagen MSX® (Figura 31) incorporada permite una superposición de imágenes térmicas y visuales, lo que mejora la claridad y facilita la interpretación de las imágenes. La cámara también cuenta con un láser incorporado para la medición de distancias, lo cual es crucial para aplicaciones que requieren un alto grado de precisión espacial [114].

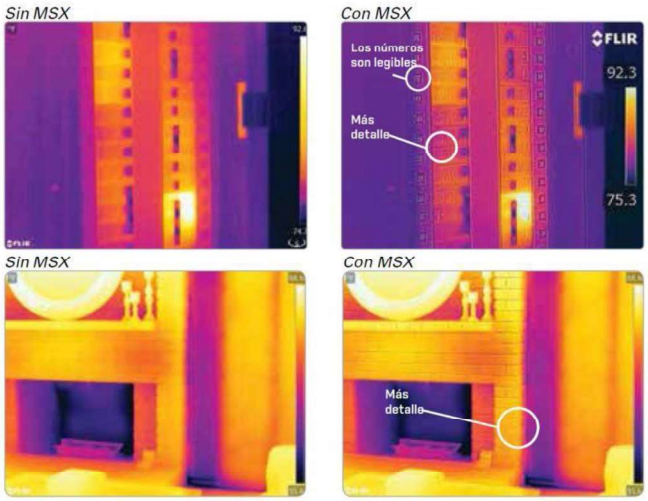


Figura 31. Modo MSX cámara termográfica FLIR.

El dispositivo también ofrece múltiples modos de medición que incluyen mediciones de puntos, áreas y diferencias de temperatura entre varios puntos. Estas funcionalidades hacen que la FLIR E60bx sea versátil y apta para una amplia gama de aplicaciones [115].

La resolución del detector de 320 x 240 píxeles facilita una alta calidad de imagen, siendo esencial para la identificación precisa de áreas problemáticas en aplicaciones de inspección. Esta resolución es significativamente más alta en comparación con cámaras termográficas de bajo costo, que suelen tener resoluciones inferiores a 160 x 120 píxeles [107].

El rango de temperatura de -20°C a +120°C es adecuado para aplicaciones en ambientes variados, desde aplicaciones en frío hasta aplicaciones en condiciones de calor extremo. Es importante notar que este rango puede no ser suficiente para algunas aplicaciones industriales especializadas que requieran un rango más amplio [116].

La sensibilidad térmica (NETD) de menos de 0.045°C permite la detección de pequeñas diferencias de temperatura, lo que es crítico para muchas aplicaciones de inspección donde las diferencias de temperatura pueden ser sutiles [117].

El campo de visión (FOV) de 25° x 19° es relativamente estándar para cámaras termográficas de este rango de precios y aplicaciones. Este FOV (Figura 32) es adecuado para la mayoría de las aplicaciones de inspección general, aunque para aplicaciones más especializadas podría ser necesario un FOV más amplio o más estrecho [118].

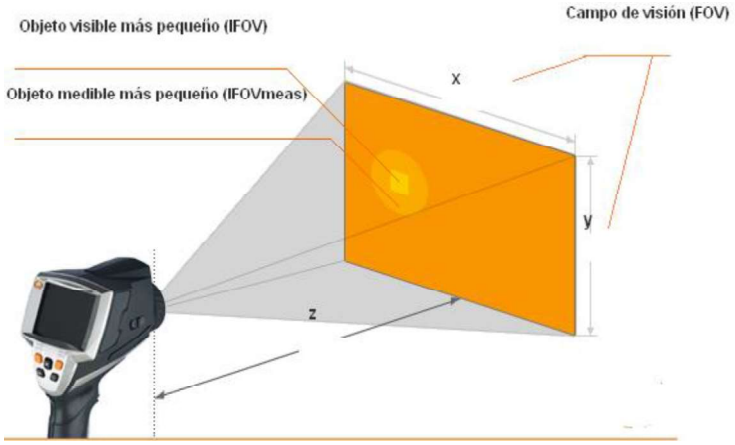


Figura 32. Campo de visión FOV. https://www.academiatesto.com.ar/cms/sites/default/files/333_03_8.jpg

La frecuencia de imagen de 60 Hz es adecuada para aplicaciones en tiempo real, donde se requiere una monitorización constante. Sin embargo, para aplicaciones que no requieren una alta tasa de actualización, modelos con menores tasas de frecuencia de imagen podrían ser más coste-eficientes [119].

La calibración en la cámara termográfica FLIR E60bx es un proceso esencial para asegurar la exactitud de las mediciones de temperatura. Este proceso se lleva a cabo generalmente en laboratorios certificados y se realiza de acuerdo con normas internacionales. La norma más relevante en este contexto es la ISO 6781:2017, "Thermal imaging for the detection of building defects and the assessment of building thermal performance" [120].

La Tabla 12. Especificaciones cámara termográfica Flir E60bx resume sus características técnicas:

Tabla 12. Especificaciones cámara termográfica Flir E60bx

Característica	Especificación
Resolución del detector	320 x 240 píxeles
Rango de temperatura	-20°C a +120°C
Sensibilidad térmica (NETD)	<0.045°C
Campo de visión (FOV)	25° x 19°
Frecuencia de imagen	60 Hz
Formato de imagen	Radiométrico .jpg
Espectro de Longitud de Onda	7.5–13 µm
Medición de Distancia	Láser incorporado
Fusión de Imagen	MSX®
Opciones de Lente	Intercambiables
Modos de Medición	Punto, área, diferencial
Operación de Un Toque	Sí
Clasificación IP	IP54
Pantalla	4,0 pulgadas
Zoom	4x continuo
Enfoque	Automático / Manual
Normativa de calibración	ISO 6781:2017
Duración de la batería	4 horas aproximadamente
Almacenamiento	Tarjeta SD
Conectividad	USB, Wi-Fi
Peso	0,825 kg
Dimensiones	246 x 97 x 184 mm

En cuanto al sensor DTH22 utiliza el 1-wire como protocolo de comunicación y usa únicamente tres de los cuatro pines para funcionar, estos son: el Vcc, Output y GND. El sensor se conecta a Arduino a través de los pines Vcc y GND utilizando una resistencia de 10.000 Ω mientras que el output se conectará a una entrada digital de Arduino como se muestra en la Figura 33. Esquema de conexión del sensor DHT22.

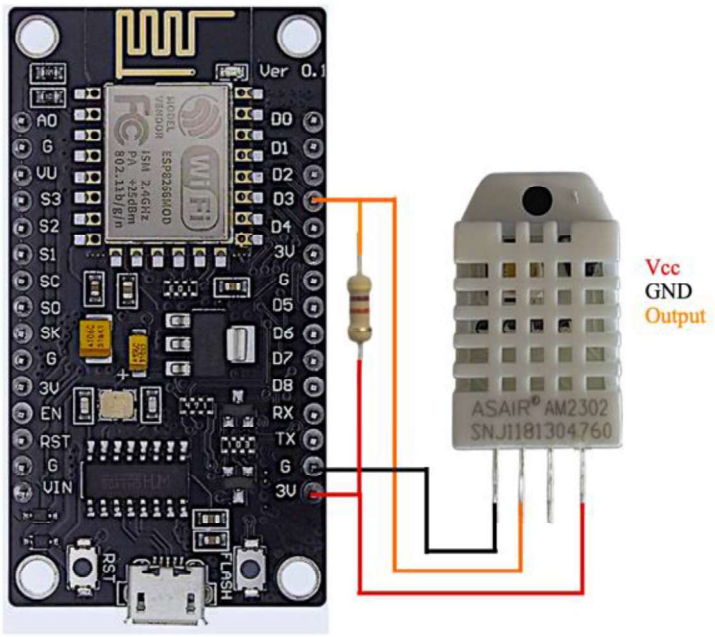


Figura 33. Esquema de conexión del sensor DHT22.

7.4 Software

7.4.1 Entorno de programación (Arduino IDE)

Arduino IDE (Figura 34) es una plataforma de código abierto que facilita el diseño y desarrollo de proyectos de electrónica. Uno de sus componentes fundamentales es el Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), este se utiliza para programar placas Arduino y está basado en el entorno de desarrollo Wiring. El objetivo principal del Arduino IDE es permitir una programación accesible y sencilla de sistemas embebidos para usuarios sin un conocimiento técnico avanzado en informática o electrónica. No obstante, también es lo suficientemente versátil como para ser utilizado en aplicaciones complejas y proyectos de investigación, incluidas las aplicaciones para la monitorización ambiental de niveles de inmisión de partículas [121]].

El IDE ofrece un editor de texto para escribir el código, que incluye resaltado de sintaxis y sugerencias de código para facilitar el desarrollo [122]. Esto se vuelve especialmente relevante para un proyecto de monitorización ambiental, donde la eficacia en la codificación es crucial.

Incorpora un compilador que traduce el código de programación de alto nivel escrito en C/C++ a instrucciones que la placa Arduino pueda ejecutar [123].

Una vez que el código ha sido compilado, el IDE permite cargar el programa en la placa Arduino a través de una conexión USB [124]].

El Arduino IDE tiene una amplia gama de bibliotecas preinstaladas que pueden utilizarse para realizar tareas específicas. En el caso de la monitorización de partículas, bibliotecas como SD para el almacenamiento en tarjeta SD y sensoriales específicas para la medición de partículas resultan de utilidad [125]].

El monitor serie (Serial monitor) del que dispone, es una herramienta incorporada que permite la comunicación bidireccional entre la placa Arduino y la computadora. Es útil para depurar y probar interacciones en tiempo real con los sensores conectados [126].

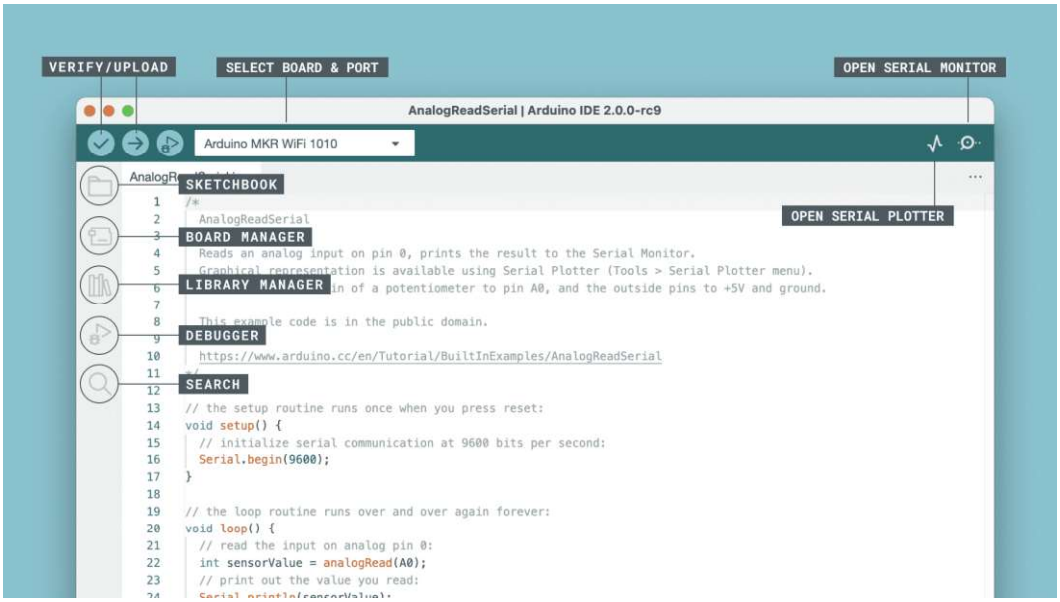


Figura 34. Interfaz Arduino IDE.

8 Descripción de la solución propuesta

Se comparten los motivos de la elección de cada dispositivo electrónico y del ensayo realizado.

8.1 Microcontrolador

La elección del Arduino Uno como la plataforma de microcontrolador para la monitorización ambiental de niveles de inmisión de partículas se justifica por múltiples razones técnicas, económicas y de comunidad.

Desde una perspectiva técnica, el Arduino Uno presenta una arquitectura basada en el microcontrolador ATmega328P, que ofrece 14 pines de entrada/salida digital, 6 pines de entrada analógica y una memoria flash de 32KB. Esta capacidad resulta adecuada para manejar varios sensores de partículas de bajo coste, además de permitir el almacenamiento de datos en una tarjeta SD a través de periféricos adicionales como módulos SD [127]. La tarjeta opera con un rango de voltaje de 5V, compatible con una amplia gama de sensores y actuadores, facilitando así la integración de múltiples dispositivos en el mismo sistema [128].

En términos económicos, Arduino Uno se destaca por su accesibilidad. Su bajo coste permite que la monitorización a gran escala sea viable sin comprometer en gran medida los recursos financieros del proyecto [129].

La amplia comunidad de usuarios y desarrolladores que rodea a Arduino es otra consideración crucial. La disponibilidad de librerías de código abierto y tutoriales facilita la implementación rápida de características y funcionalidades, reduciendo la curva de aprendizaje y acelerando el ciclo de desarrollo [123]. Esto es especialmente útil en el ámbito de la investigación, donde la rapidez en la obtención de resultados puede ser un factor crítico.

8.2 Sistema de almacenamiento

La elección de una tarjeta SD (Secure Digital) como medio de almacenamiento para este proyecto de monitorización ambiental se fundamenta en criterios multifactoriales, incluidos aspectos como la capacidad de almacenamiento, la confiabilidad, la facilidad de uso y consideraciones económicas.

En el ámbito de la capacidad de almacenamiento, las tarjetas SD presentan una solución eficiente para la acumulación de grandes volúmenes de datos en formatos compactos. Esta propiedad es especialmente relevante en aplicaciones de monitorización a largo plazo, donde se generan series temporales de datos a lo largo de periodos extendidos [130].

Respecto a la confiabilidad, la tecnología subyacente de las tarjetas SD ha evolucionado para ofrecer resistencia contra fallos comunes como la corrupción de datos. Además, diversas variantes de estos dispositivos incorporan características como resistencia a factores ambientales (temperatura, agua), lo que amplía su aplicabilidad en entornos exteriores o condiciones adversas [131].

La facilidad de uso y transferencia de datos es otra variable que respalda la elección de una tarjeta SD. Este tipo de almacenamiento es compatible con una variedad significativa de dispositivos y sistemas, lo que simplifica el proceso de recuperación y análisis de datos sin requerir equipos o software especializados [132].

Desde una perspectiva económica, la accesibilidad y bajo costo de las tarjetas SD representan un aspecto ventajoso, especialmente para proyectos con restricciones presupuestarias [133].

8.3 Urna

La decisión de incorporar una urna con humidificador en el diseño del sistema de monitorización ambiental responde a varios imperativos científicos y metodológicos.

En el contexto de la medición de partículas en suspensión, uno de los factores que puede introducir variabilidad en los resultados es la humedad ambiental. La presencia de humedad puede alterar tanto el tamaño como la dinámica de las partículas en el aire. Por tanto, el control de la humedad dentro de una urna aislada provee un entorno más estandarizado para la captura y análisis de partículas [134].

Adicionalmente, el uso de un humidificador dentro de la urna puede servir para simular diferentes condiciones atmosféricas, lo cual es útil para evaluar el rendimiento del sensor bajo diversas circunstancias. Esto amplía la robustez de los datos recogidos y permite una validación más completa del sistema [135].

Desde el punto de vista de la calibración del sensor, mantener condiciones ambientales controladas es fundamental para la obtención de mediciones precisas. La urna con humidificador facilita este control, permitiendo ajustes más exactos y, en última instancia, un mejor rendimiento del sensor [136].

Asimismo, el diseño de la urna con humidificador permite implementar un enfoque de monitorización más versátil. Esto es particularmente relevante para el estudio de microclimas o zonas geográficas con variabilidad climática, donde el sensor debe ser capaz de operar bajo diferentes niveles de humedad para ofrecer datos fiables [137].

En cuanto al diseño de la urna esta emplea materiales plásticos reciclados de dimensiones 71x50x50cm (Figura 35).

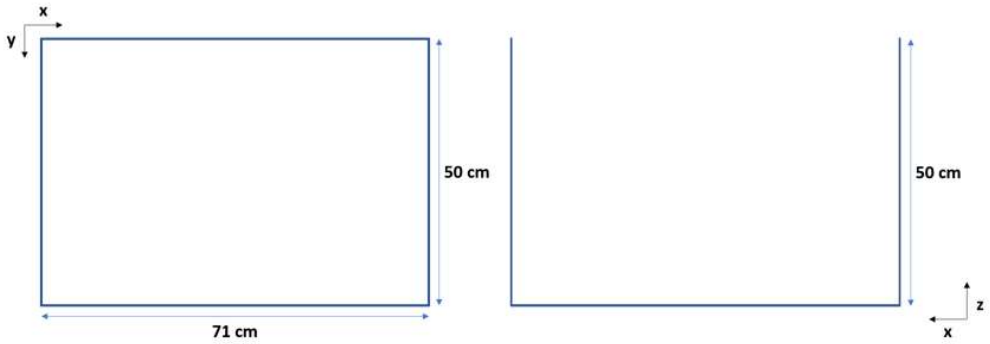


Figura 35. Dimensiones de la urna.

Aisladas a través de material de impresión 3D por las esquinas (Figura 36).

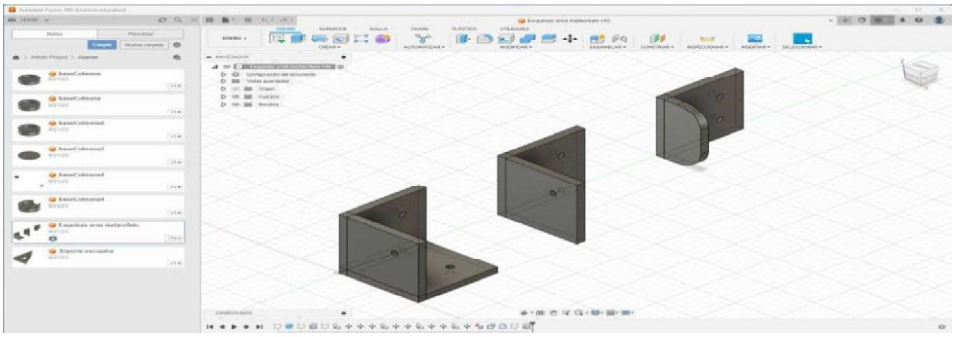


Figura 36. Impresión 3D para recubrir esquinas.

En ella se ha realizado la distribución espacial de los sensores de la siguiente manera (Figura 37):

Figura 37. Distribución espacial de los sensores y urna empleada.

8.4 Sensores

La selección de los sensores SEN0177, SDS011, SEN54 y SPS30 para la monitorización ambiental de niveles de inmisión de partículas se fundamenta en una serie de criterios técnicos, económicos y metodológicos. Tomando de referencia las características técnicas de la Tabla 8. Comparación hojas de datos entre sensores de bajo costo..

El sensor SEN0177 destaca por su sensibilidad a partículas PM2.5, además de su capacidad para medir compuestos orgánicos volátiles. Este sensor es adecuado para aplicaciones donde se desea una alta resolución y sensibilidad en las mediciones [70].

El sensor SDS011 ofrece ventajas significativas en términos de costo-beneficio. Su diseño láser permite mediciones de alta precisión para partículas PM10 y PM2.5 en un rango amplio de concentraciones. Su estructura mecánica también facilita la limpieza y mantenimiento, lo que es crucial para la operación a largo plazo [82].

En el caso del sensor SEN54, su aplicabilidad radica en la detección de partículas ultrafinas y gases. Esto lo hace particularmente útil para estudios más complejos que involucran la correlación entre diferentes tipos de contaminantes. Además, este sensor proporciona una respuesta rápida, lo cual es beneficioso para la monitorización en tiempo real [138].

El sensor SPS30 se caracteriza por su capacidad para medir múltiples tamaños de partículas, incluidas PM1, PM2.5, PM4 y PM10. Además, cuenta con una interfaz de comunicación sofisticada que facilita la calibración y la adquisición de datos. Su diseño también minimiza el efecto de la humedad en las mediciones, proporcionando así una mayor precisión [139].

Cada uno de estos sensores aporta capacidades distintas que son complementarias entre sí, permitiendo una monitorización más integral y precisa de los niveles de inmisión de partículas. Esta combinación de sensores contribuye a la robustez del diseño del sistema, garantizando una mayor fidelidad y confiabilidad en los datos recopilados.

8.5 Sensor de referencia

Tras analizar la Tabla 11. Comparativa equipos de referencia y SDS011.Tabla 11 se ha decidido tomar el sensor **Temtop M2000 2ª Nd**

como sensor de referencia en lugar del sensor Rs-Pro en el sistema de monitorización ambiental se basa en una serie de consideraciones técnicas, de rendimiento y de conformidad con los estándares de calidad.

Una de las principales consideraciones es la precisión. El sensor Temtop ha demostrado una mayor precisión en la medición de partículas PM2.5 y PM10, cumpliendo con las estrictas directrices de organismos como la EPA y la Unión Europea. Su precisión ha sido verificada en múltiples estudios científicos, lo que lo convierte en un estándar de referencia altamente fiable.

En cuanto al aspecto del rendimiento, el sensor Temtop exhibe una menor susceptibilidad a factores que podrían afectar la medición, como son la humedad y las variaciones de temperatura. Este nivel de estabilidad es esencial para la calibración precisa de los sensores de bajo costo utilizados en el sistema, garantizando así la fidelidad y confiabilidad de los datos recogidos.

El Temtop también ofrece un sistema de almacenamiento propio, facilitando la evaluación de los resultados, este ha sido configurado con un tiempo de muestreo de 5 minutos sin interpolación.

8.6 Ensayo

El protocolo experimental se lleva a cabo en las instalaciones de la Escuela de Minas y Energía de la Universidad Politécnica de Madrid, se instaura un entorno experimental controlado, estructurado en torno a una arquitectura sensorial compuesta de Arduino Uno y escudos SD. Esta arquitectura está interconectada a un hub centralizado, que a su vez se vincula a un ordenador portátil para el monitoreo en tiempo real mediante Arduino IDE. Esta disposición arquitectónica se opta con el objetivo de conformar un sistema de adquisición de datos distribuido y altamente modular, facilitando así la captura, almacenamiento y análisis de datos en tiempo real (Figura 38).

La urna experimental es el entorno en el que se evaluán una serie de sensores de partículas en condiciones controladas y rigurosamente definidas. Los parámetros de la urna, tales como su estado abierto o cerrado y la presencia o ausencia de ventilación, se modulan en segmentos de tiempo de 30 minutos. La manipulación de estos parámetros se realiza para examinar su influencia en la eficacia de los sensores bajo distintas condiciones . Por tanto se toman cuatro fases de ensayo:

Primera fase: urna abierta sin ventilación.

Segunda fase: urna cerrada con ventilación.

Tercera fase: urna cerrada con ahumador buscando la saturación.

Cuarta fase: urna cerrada con ahumador buscando etapas de concentración de particulado constantes con incremento y decremento progresivo de la concentración PM.

Dentro de la urna, un ahumador se encarga de emitir partículas en concentraciones variables, desde estados basales hasta niveles de saturación. La elección de este rango de concentraciones se justifica para analizar la sensibilidad y la linealidad de los sensores a lo largo de todo su rango operativo. Paralelamente, la inclusión de un ventilador en el diseño tiene la función específica de evitar la estratificación de partículas, asegurando un campo de partículas más homogéneo y, por ende, mediciones más confiables.

Para una medición más integral, se integra un sensor DHT22 con el fin de registrar datos de temperatura y humedad relativa. La razón subyacente es que estas variables microclimáticas pueden influir significativamente en las características de dispersión y sedimentación de las partículas en suspensión.

La disposición espacial de los sensores —SEN0177, SDS011, SEN54, SPS30 y Temtop como sensor de referencia— es cuidadosamente estandarizada. Se establece una distancia uniforme de 15 cm con respecto a la fuente de emisión de partículas y 5 cm de las paredes de la urna. Esta meticulosa disposición espacial tiene como objetivo minimizar cualquier variabilidad que pudiera introducirse por factores geométricos, permitiendo así una comparación más precisa y fidedigna entre los sensores.

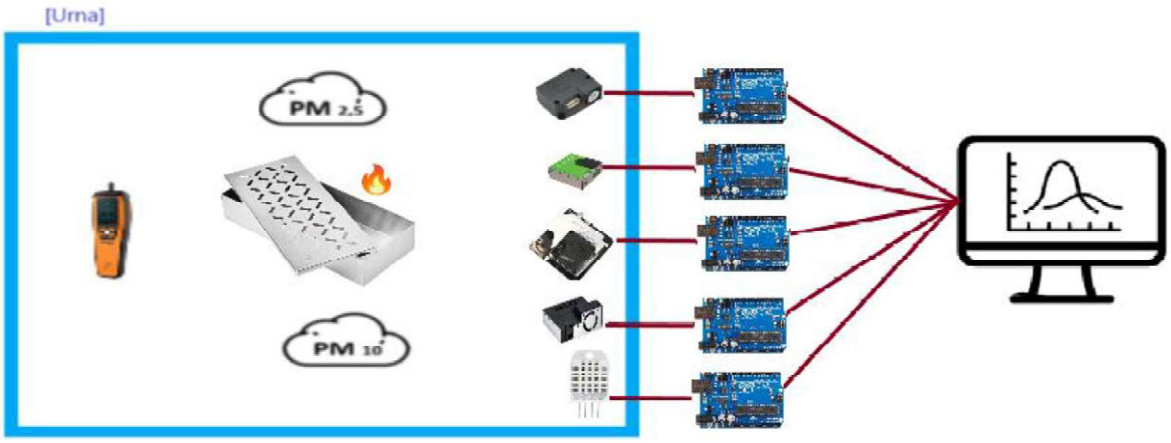


Figura 38. Arquitectura del diseño.

9 Resultados y discusión

Se comparten los resultados del ensayo realizado así como de los cálculos matemáticos.

9.1 Tratamiento de los datos

En el contexto experimental del presente trabajo, la estructuración, sincronización y depuración de datos se configuran como elementos críticos para la validez y robustez de las investigaciones subsecuentes. A través de un meticuloso proceso de preprocesamiento, se efectúa la transmutación del dataset en bruto, adquirido de distintos dispositivos de sensado ambiental de bajo costo y un instrumento de referencia (Temtop M2000), en un corpus de información analíticamente significativo. Es importante subrayar que, si bien los sensores de bajo costo carecen de marcas temporales, el instrumento de referencia las incluye, estableciendo así un marco cronológico de referencia para el conjunto total de las mediciones.

Los datos han sido limitados a la saturación del dispositivo Temtop, esto es que para valores de concentración pm µg/m³ superiores a 1000 µg/m³ se establece el límite 1000 µg/m³.

En la fase de sincronización temporal, se adoptan intervalos temporales múltiples, concretamente de 10 segundos, 1 minuto y 5 minutos. Esta diversificación temporal facilita la identificación de fenómenos transitorios, tales como picos en las concentraciones particuladas, que sirven como eventos sincronizadores entre las distintas fuentes de datos. El instrumento de referencia opera como un patrón temporal de 5 minutos, asegurando una correlación precisa entre los distintos conjuntos de datos se busca la sincronización a través del pico inicial significativo en medida.

Subsiguientemente, se ejecuta una etapa de depuración de datos, en la cual se procede a la identificación y eliminación de outliers y mediciones aberrantes. Este paso es imperativo para asegurar la integridad de los datos y, por ende, la validez de cualquier inferencia analítica que se derive de ellos. En la fase de normalización y estandarización, se implementan algoritmos específicos para homogeneizar las mediciones. Esto implica ajustes unitarios y correcciones escalares para garantizar la coherencia inter-sensorial y la comparabilidad con el instrumento de referencia.

Esta etapa es completamente necesaria debido a que cada uno de los dispositivos ha comenzado la medida a diferencias de aproximadamente 30 segundos, pudiendo ello repercutir en los resultados finales. Las medidas han sido tomadas sin emplear la interpolación.

Finalmente, se integran las mediciones depuradas y sincronizadas en un único conjunto de datos estructurado. Este corpus unificado se estructura de forma tal que incluye marcas temporales y columnas que corresponden a cada uno de los dispositivos de sensado. Para corroborar la coherencia y representatividad del dataset unificado, se realiza una validación de las tendencias y patrones emergentes, contrastándolos con las expectativas teóricas y objetivos del diseño experimental.

La humedad muestra diferencias según el sensor, temporalmente se mantiene entre un 28-40% durante el ensayo (Figura 39. Medida de humedad durante el ensayo.) mostrando fluctuaciones en un rango de 5%. Al ser el dispositivo Temtop un dispositivo calibrado se puede estimar la media de Humedad en 37,5% durante el ensayo.

La temperatura y la humedad tienen efectos conocidos en la dinámica de las partículas en el aire. Por ejemplo, una alta humedad puede llevar a la aglomeración de partículas, lo que podría afectar la eficacia de los sensores en la detección de partículas PM2.5 y PM10. De manera similar, las variaciones en la temperatura pueden influir en la densidad del aire y, en consecuencia, en la dispersión de las partículas.

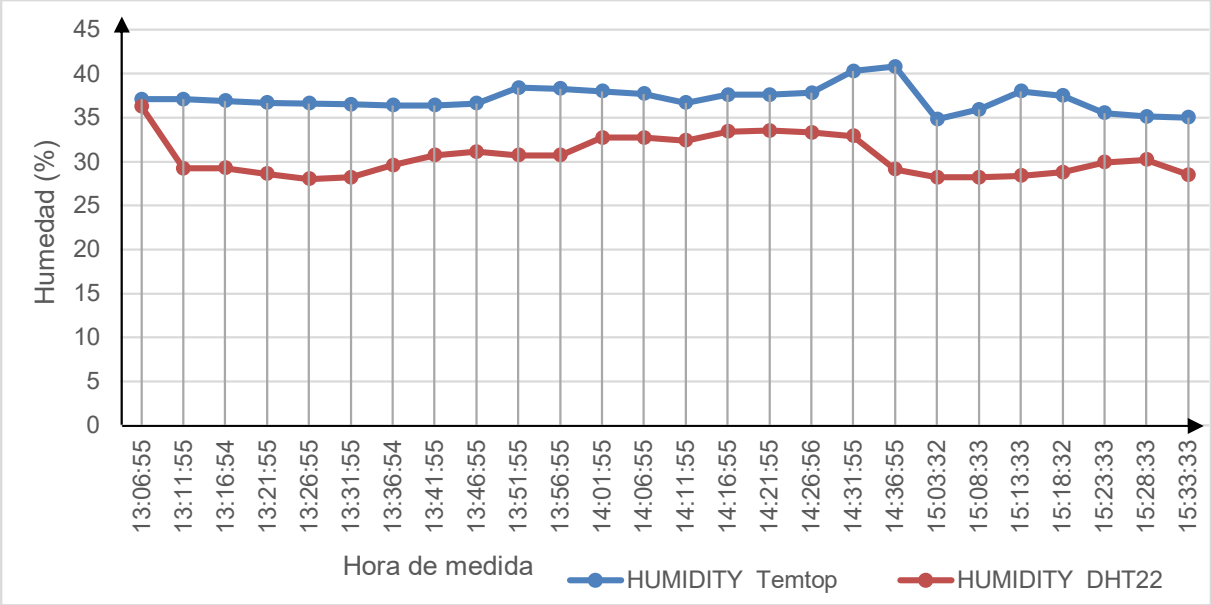


Figura 39. Medida de humedad durante el ensayo.

La temperatura Figura 42 muestra un aumento de nivel de 2,5ºC desde el comienzo de la medición, desde los 29,1ºC a los 31,7ºC. Puede ser debido a la presencia del ahumador en funcionamiento y la hora de la medida.

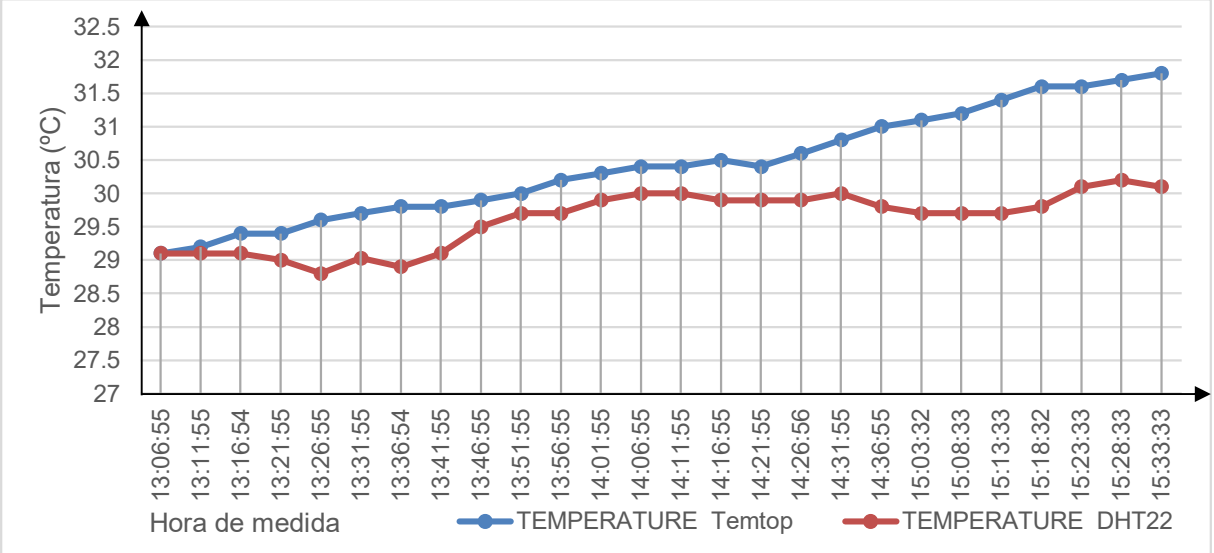


Figura 40. Medición de temperatura durante el ensayo..

En el conjunto de datos, ambos tipos de sensores (Temtop y DHT22) muestran variabilidad en sus mediciones de temperatura y humedad. En un entorno controlado, diferencias significativas entre los sensores podrían indicar un error de calibración o una falta de precisión que necesite ser corregida antes de realizar mediciones para estudios ambientales más amplios.

Para ampliar el factor temperatura se muestra la contribución térmica de los dispositivos involucrados en la Figura 41 (imágenes tomadas con FLIR E60bx):

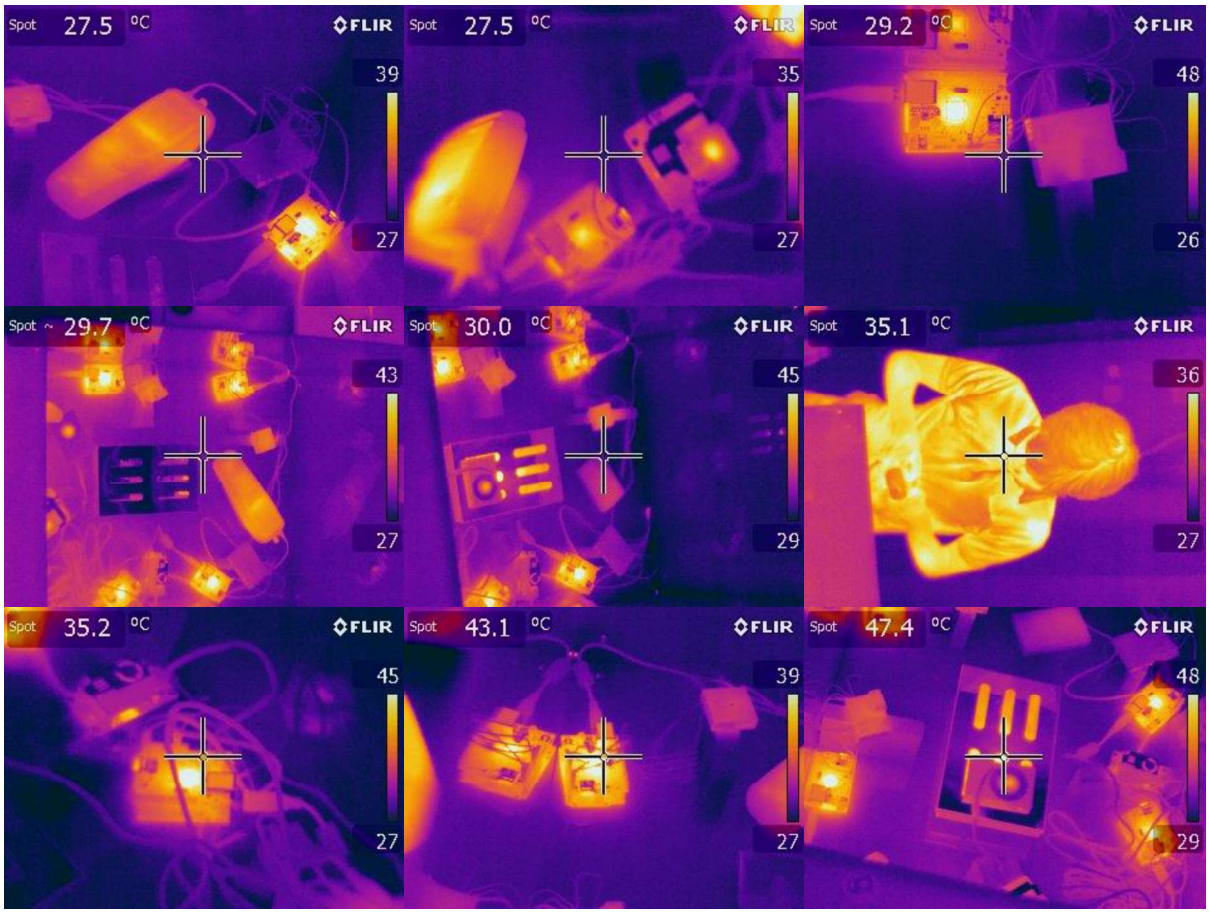


Figura 41. Fotografías térmicas tomadas durante el ensayo con la FLIR E60bx, ordenados a menor a mayor grado de temperatura: 1. Sensor de referencia Tempto. 2.Urna exterior. 3.Interior urna. 4. Interior Urna. 5. Interior urna. 6.Persona. 7. Arduino Uno. 8.Arduino Uno. 9. Ahumador.

9.2 Comparación de resultados entre sensores

En un primer análisis se realiza una comparativa general entre todos los sensores, tomando en cuenta la desviación estándar, su media y mediana para cada etapa de la medición.

Para comenzar se observa la evolución inicial de los datos sin filtrar para un muestreo de 10 segundos entre los sensores sin el de referencia (Anexos D). Es apreciado un comportamiento semejante en las gráficas de los dispositivos sensirion Sensirion, el comportamiento que difiere en mayor medida es el del sensor SEN460 respecto al resto.

Tras el análisis general, se realiza un análisis específico de cada etapa.

De la Tabla 13. Etapa abierta comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos. y la Figura 42. Concentración PM en función del tiempo entre todos los sensores. se estudia el comportamiento de los sensores en la etapa abierta para un muestreo de 5 minutos. Las métricas matemáticas muestran al Sensor SEN460 como inadecuado, ya que analiza 0 µg/m³ para toda la etapa. Los resultados de los demás sensores aún semejantes entre ellos, principalmente los Sensirion con un análisis semejante, distan del comportamiento del sensor de referencia. Las causas pueden ser diversas, desde las externas al sensor como la toma de la muestra en un instante temporal mínimamente diferente, o por la falta de presencia de un ventilador conllevando a la estratificación.

Tabla 13. Etapa abierta comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos.

	Métrica	Abierto SEN54	Abierto SPS30	Abierto SDS011	Abierto SEN460	Abierto Temptop
PM10 µg/m³	Media	1,00	1,02	2,14	0,00	5,33
	Mediana	0,95	0,91	1,80	0,00	5,30
	Desviación Estándar	0,50	0,50	1,86	0,00	0,96
PM2.5 µg/m³	Media	0,92	1,07	0,66	0,01	4,62
	Mediana	0,90	0,90	0,70	0,01	4,55
	Desviación Estándar	0,44	0,70	0,30	0,00	0,68

Analizando el Anexos D con los datos sin filtrar durante la primera media hora y realizando una media sobre estos datos se calcula la siguiente Tabla 14:

Tabla 14. Etapa abierta media resultados PM durante los primeros 30 minutos de cada sensor a un muestreo de 30 segundos.

PM10 µg/m³ media muestreo 10 segundos en 30 minutos			
SEN460	SEN54	SPS30	SDS011
0	1,74	2,64	6,32
PM2.5 µg/m³ media muestreo 10 segundos en 30 minutos			
SEN460	SEN54	SPS30	SDS011
0,00	1,45	1,91	0,89

Se percibe al sensor SDS011 como el más próximo al resultado del sensor de referencia para partículas PM10, mientras que para el particulado PM2,5 el sensor con un mejor comportamiento es el Sensirion SPS30, aunque los resultados percibidos rondan la mitad de valor medio que los detectados por el Temtop para PM2,5.

La siguiente etapa Cerrada Tabla 15 y Figura 42. Concentración PM en función del tiempo entre todos los sensores. para un muestreo de 5 minutos, adquiere resultados esperados de bajada de concentración general PM. Por del cierre de la urna y el uso de un ventilador para eliminar la estratificación. Se consigue reducir la concentración al no tener fuentes generadoras de particulado.

El comportamiento percibido por los sensores es semejante con valores de concentración bajos, menos para el Sensor de referencia, que a pesar de haber tenido una reducción de un 10% en su nivel de concentración medio, sigue cuadriplicando el valor analizado al resto de los sensores.

Tabla 15. Etapa cerrada comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos.

	Métrica	Cerrado SEN54	Cerrado SPS30	Cerrado SDS011	Cerrado SEN460	Cerrado Temptop
PM10 µg/m³	Media	0,75	0,58	0,88	0,00	4,30
	Mediana	0,65	0,55	0,85	0,00	4,20
	Desviación Estándar	0,26	0,24	0,55	0,00	0,51
PM2.5 µg/m³	Media	0,73	0,30	0,25	0,01	4,03
	Mediana	0,65	0,25	0,20	0,01	4,00
	Desviación Estándar	0,23	0,13	0,08	0,00	0,35

Analizando el Anexos D con los datos sin filtrar durante la primera media hora y realizando una media sobre estos datos se calcula la siguiente Tabla 16:

Tabla 16. Etapa cerrada media resultados PM durante los primeros 30 minutos de cada sensor a un muestreo de 30 segundos.

PM10 µg/m³ media muestreo 10 segundos en 30 minutos			
SEN460	SEN54	SPS30	SDS011
0	0,68	0,85	1,61
PM2.5 µg/m³ media muestreo 10 segundos en 30 minutos			
SEN460	SEN54	SPS30	SDS011
0,00	0,64	0,70	0,32

El comportamiento más cercano al del sensor de referencia es el del SDS011 para PM10, con la mitad de valor medio durante la etapa. Mientras que para PM2.5 a pesar de ser todos los valores de menor concentración el de mayor proximidad es el sensor SPS30. El comportamiento del SDS011 para PM2.5 vuelve a reducir su exactitud.

El sensor SEN460 vuelve a dar valores de 0 µg/m^3 siendo inadecuado para estos niveles bajos de concentración PM.

La etapa de saturación Tabla 17 y Figura 42. Concentración PM en función del tiempo entre todos los sensores. para un muestreo de 5 minutos, muestra niveles de concentración medidas semejantes entre la mayoría de los sensores, esto se debe a que la urna se encuentra totalmente saturada de particulado PM y a que se ha establecido el máximo límite de saturación de los sensores en 1000 µg/m³. Por tanto, la diferencia se adquiere en el valor anterior es la debida a los valores justo anteriores y posteriores a entrar en saturación, estos son dependientes de los factores de cada sensor.

Tabla 17. Etapa saturada comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos .

	Métrica	Saturado SEN54	Saturado SPS30	Saturado SDS011	Saturado SEN460	Saturado Temptop
PM10 µg/m³	Media	600,35	688,55	596,67	686,00	698,82
	Mediana	639,60	1000,00	700,70	1000,00	999,90
	Desviación Estándar	439,91	482,75	456,18	487,83	467,35
PM2.5 µg/m³	Media	579,17	652,79	533,82	684,67	633,90
	Mediana	616,40	890,45	506,05	1000,00	837,20

	Desviación Estándar	463,23	461,15	440,78	489,70	459,01

Los comportamientos de cada sensor son semejantes. El sensor con valores más adecuados es el SPS30. Para esta etapa las medias de los sensores no difieren de la media del Temtop en más del 10%, teniendo la mayor diferencia el sensor SEN54. El sensor SDS011 muestra una media con concentración superior al de referencia, siendo el único que la supera, esto es de gran importancia porque repercute en el análisis posterior de los valores tomados.

La etapa progresiva Tabla 18. Etapa progresiva comparativa métrica entre sensores y Figura 42. Concentración PM en función del tiempo entre todos los sensores. para un muestreo de 5 minutos.

Tabla 18. Etapa progresiva comparativa métrica entre sensores sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos.

	Métrica	Progresivo SEN54	Progresivo SPS30	Progresivo SDS011	Progresivo SEN460	Progresivo Temptop
PM10 µg/m³	Media	508,17	333,26	241,76	318,80	412,88
	Mediana	501,90	266,26	72,90	234,00	337,20
	Desviación Estándar	475,04	371,12	337,43	399,32	339,06
PM2.5 µg/m³	Media	488,10	316,08	202,18	314,80	297,62
	Mediana	443,70	214,50	60,20	225,00	234,30
	Desviación Estándar	465,62	371,38	306,70	400,82	259,71

Durante esta etapa se muestran niveles de concentración moderados, teniendo el sensor SPS30 la media más próxima al sensor de referencia. El sensor que tiene un peor comportamiento en esta etapa es el sensor SDS011, con una diferencia de valores analizados de la mitad de concentración.

La suma de las etapas Tabla 19 permite analizar el comportamiento durante todo el tiempo de medición.

Tabla 19. Etapa suma de etapas, total comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos.

	Métrica	Total SEN54	Total SPS30	Total SDS011	Total SEN460	Progresivo Total
PM10 µg/m³	Media	266,49	245,64	208,92	248,26	280,33
	Mediana	1,70	1,99	5,00	0,00	8,25
	Desviación Estándar	409,90	400,85	364,34	412,41	402,92
PM2.5 µg/m³	Media	261,53	239,25	196,17	247,66	235,04
	Mediana	1,60	1,98	3,90	0,01	6,45

	Desviación Estándar	403,73	388,93	346,92	407,92	361,61

El comportamiento del sensor SPS30 es el que menos difiere de la media del sensor Temtop para la concentración PM10, siendo el que tiene mayor diferencia el sensor SEN460. Mientras que para la concentración PM2.5 el sensor con resultados semejantes es el SEN460, seguido del SDS011, siendo el peor comportamiento el del sensor SPS30 con una diferencia en su media del 4% respecto del de referencia.

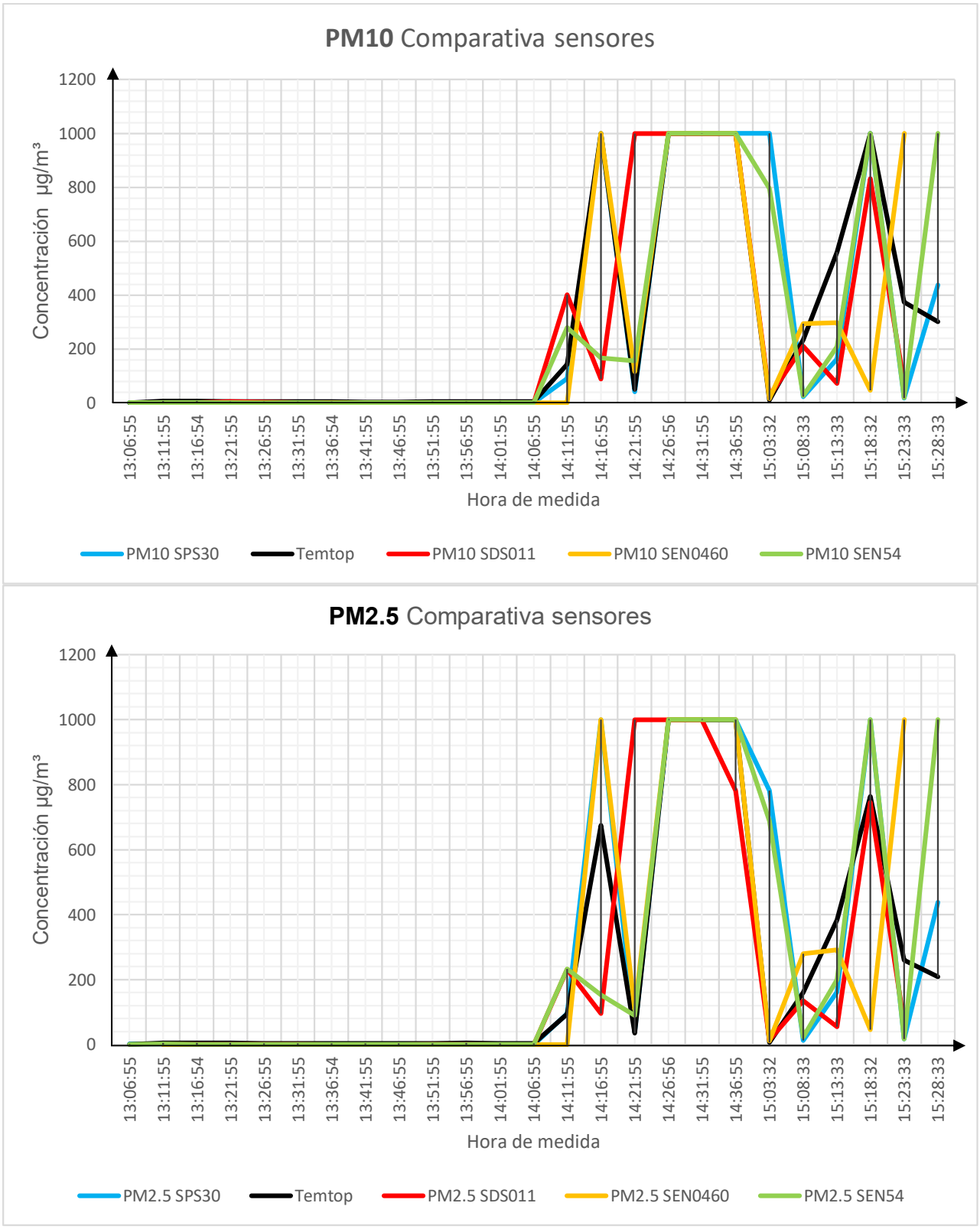


Figura 42. Concentración PM en función del tiempo entre todos los sensores.

9.3 Comparación de resultados entre los sensores y la instrumentación de referencia

Se realiza un análisis comparativo específico para cada uno de los sensores con respecto del de referencia. Para los resultados del muestreo de 5 minutos.

Tabla 20. Correlación lineal Temtop vs SPS30.

PM10		PM2,5	
Etapa	R^2:	Etapa	R^2:
Sin ahumador	0,69	Sin ahumador	0,87
Saturación	1,00	Saturación	0,95
Controlado	0,89	Controlado	0,88
Total	0,98	Total	0,95

El sensor SPS30 adquiere correlación alta con respecto al sensor de referencia Temtop (Tabla 20 y Figura 43). Las etapas con mayor correlación son las de saturación y progresiva.

Teniendo en la etapa de saturación correlación directa para PM10 y en la progresiva una correlación moderadamente alta. El resultado general de la correlación es positivo, casi demostrando correlación directa para ambos tamaños de partículas.

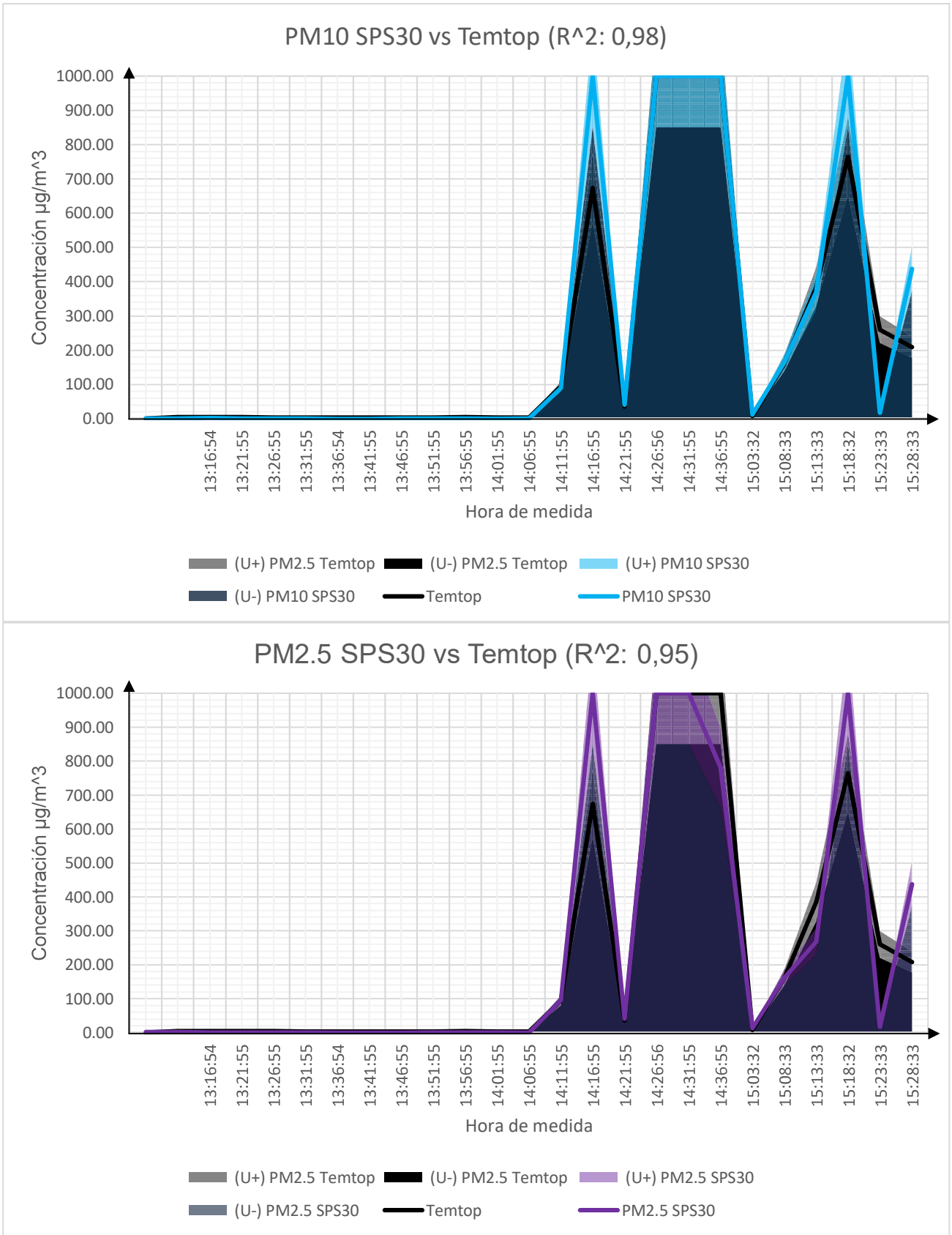


Figura 43. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SPS30.

El sensor SDS011 (Tabla 21 y Figura 44) muestra una correlación moderadamente alta. Sus etapas de saturación y sin ahumador en PM2,5 tienen un comportamiento correlativo alto. El resultado general muestra una correlación alta con respecto al sensor de referencia.

Tabla 21. Correlación lineal Temtop vs SDS011.

PM10		PM2,5	
Etapa	R^2:	Etapa	R^2:
Sin ahumador	0,19	Sin ahumador	0,86
Saturación	0,91	Saturación	0,94
Controlado	0,55	Controlado	0,57
Total	0,87	Total	0,89

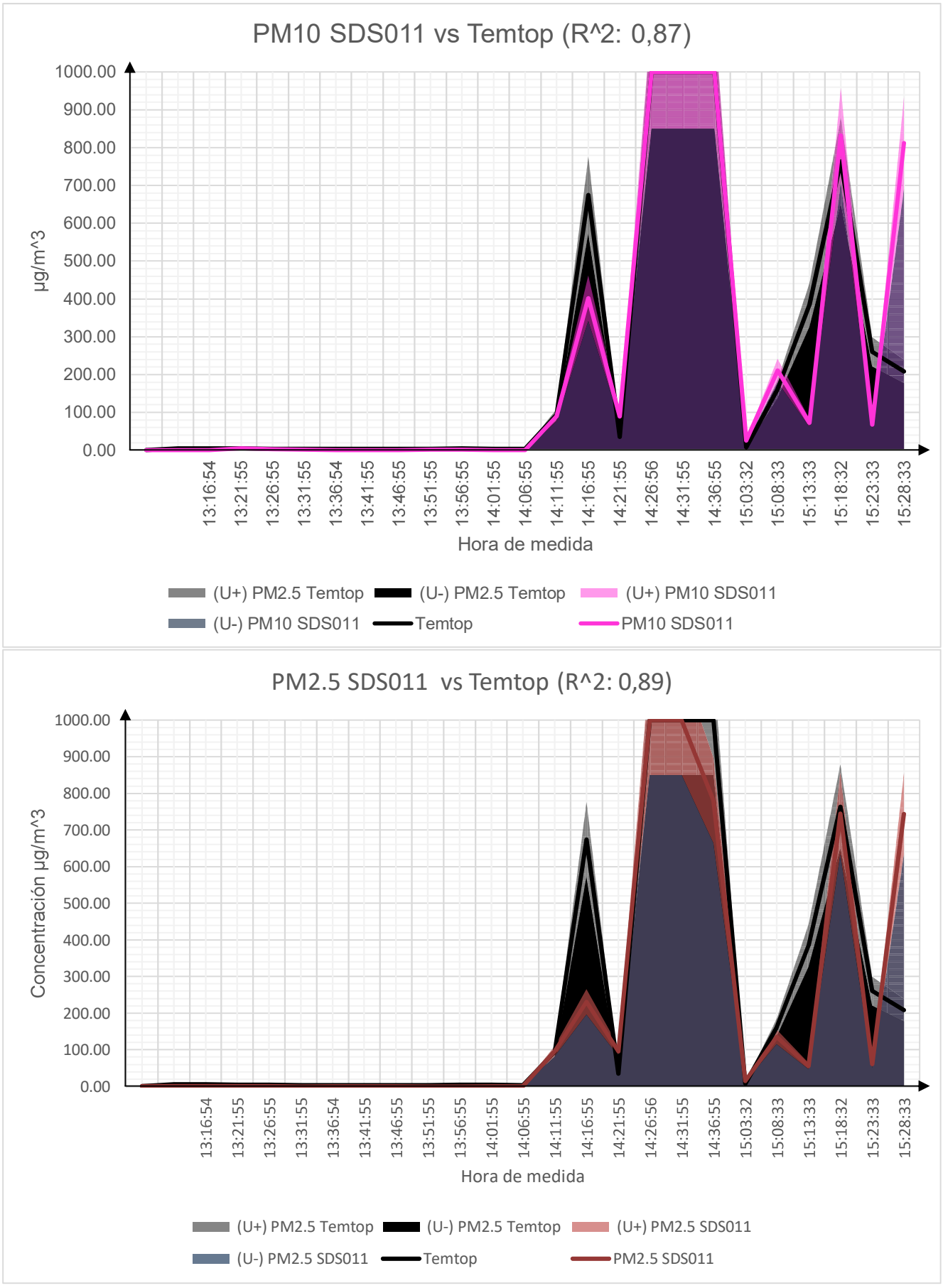


Figura 44. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SDS011.

(Figura 45 y Tabla 22) La etapa sin ahumador muestra correlación 0, esto es debido a que el sensor SEN0460 ha determinado valores nulos durante esta etapa. La fase del ensayo controlada muestra correlación adecuada con el sensor Temtop para ambas concentraciones. El resultado general determinado es correlación alta, aunque debido a que durante la primera media hora los resultados entregados por este sensor han sido nulos, no se determina como adecuada esta representación

Tabla 22. Correlación lineal Temtop vs SEN0460.

PM10		PM2,5	
Etapa	R^2:	Etapa	R^2:
Sin ahumador	-0,00	Sin ahumador	-0,00
Saturación	0,99	Saturación	0,97
Controlado	0,66	Controlado	0,73
Total	0,94	Total	0,94

.

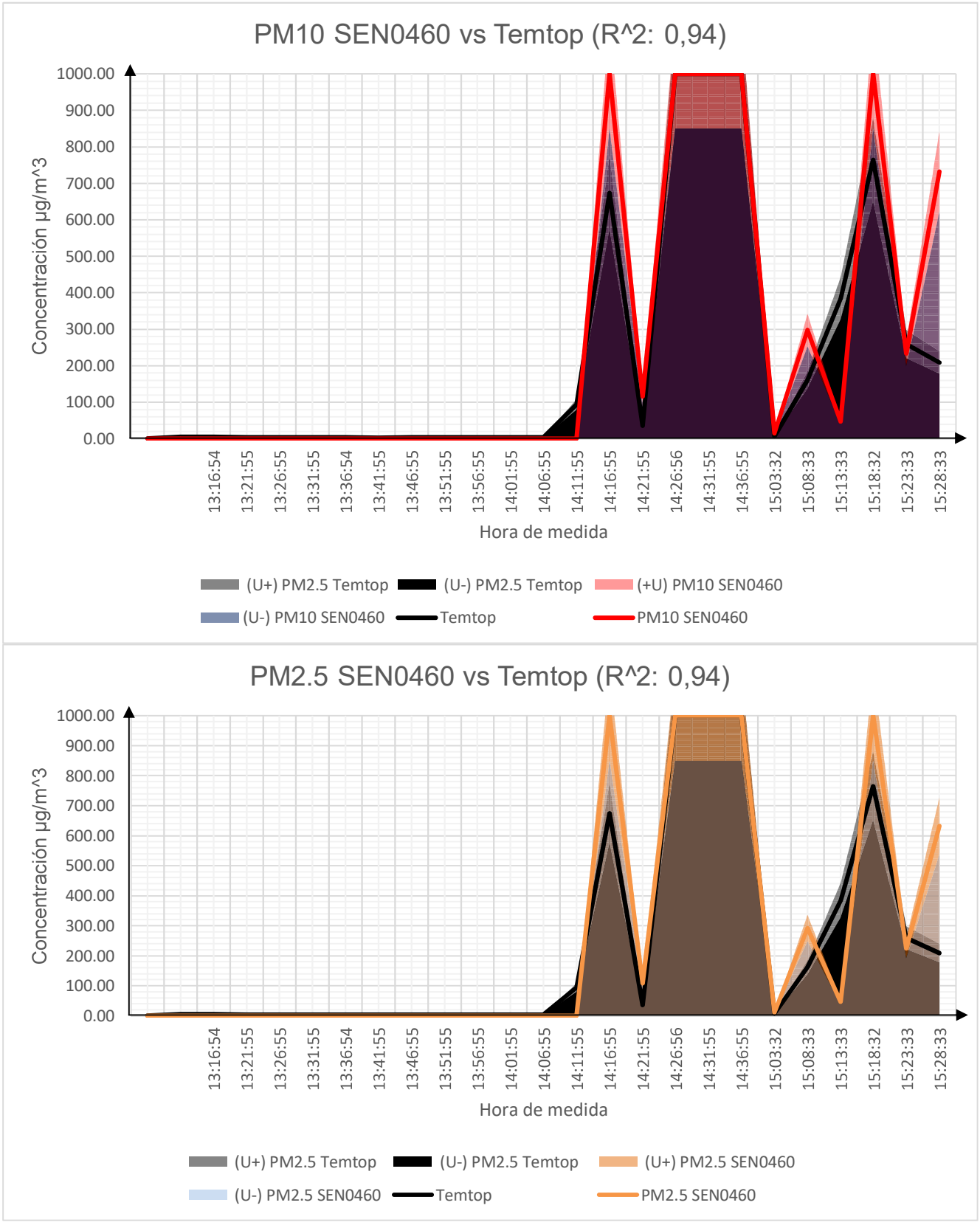
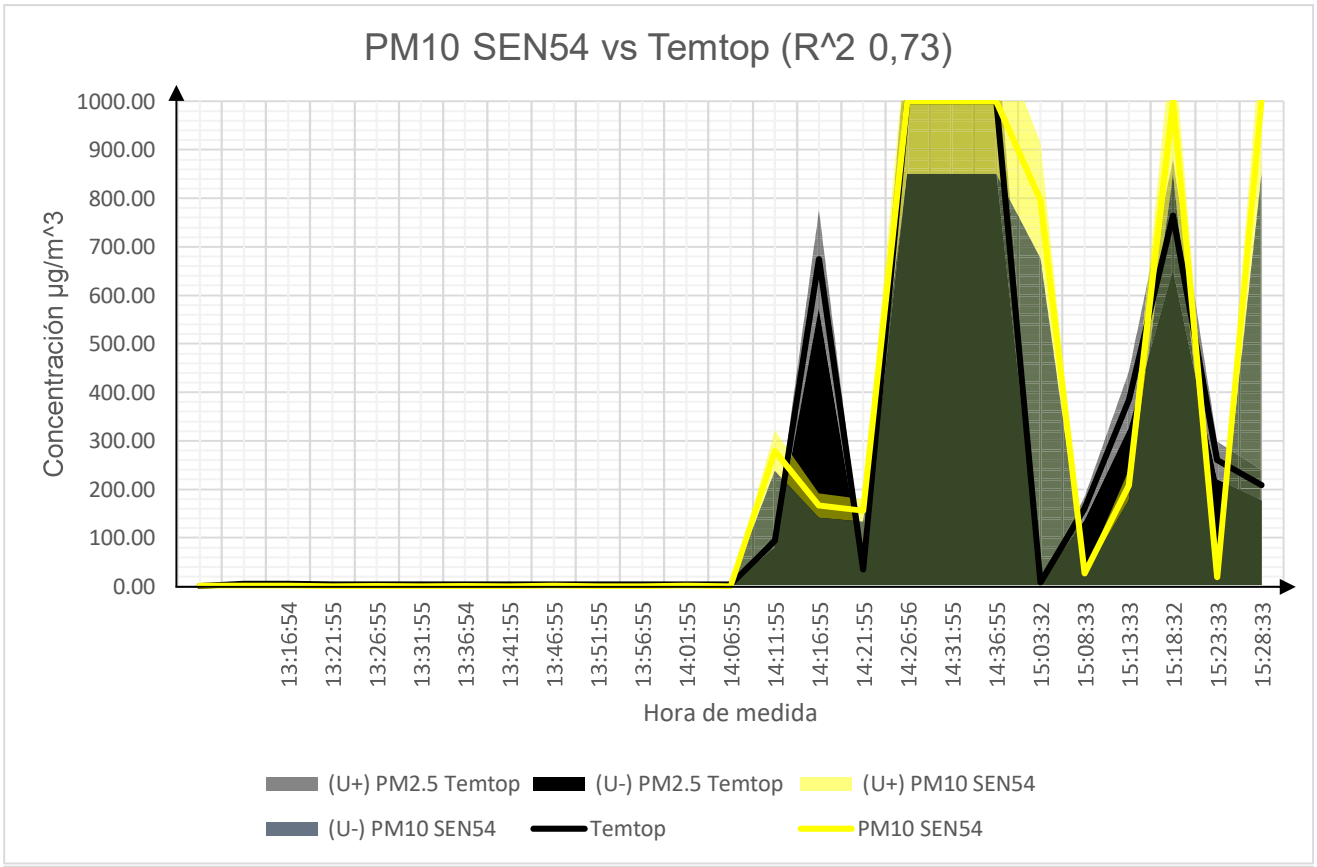


Figura 45. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SEN460.

(Figura 46 y Tabla 23. Correlación lineal Temtop vs SEN54.) La correlación mostrada por el sensor SEN54 se determina como adecuada. Su comportamiento durante la etapa progresiva dista de la del sensor de referencia. La etapa de saturación adquiere la correlación más elevada para ambas partículas en suspensión.

Tabla 23. Correlación lineal Temtop vs SEN54.

PM10 µg/m³		PM2,5 µg/m³	
Etapa	R^2	Etapa	R^2:
Sin ahumador	0,57	Sin ahumador	0,62
Saturación	0,80	Saturación	0,91
Controlado	0,22	Controlado	0,32
Total	0,73	Total	0,79



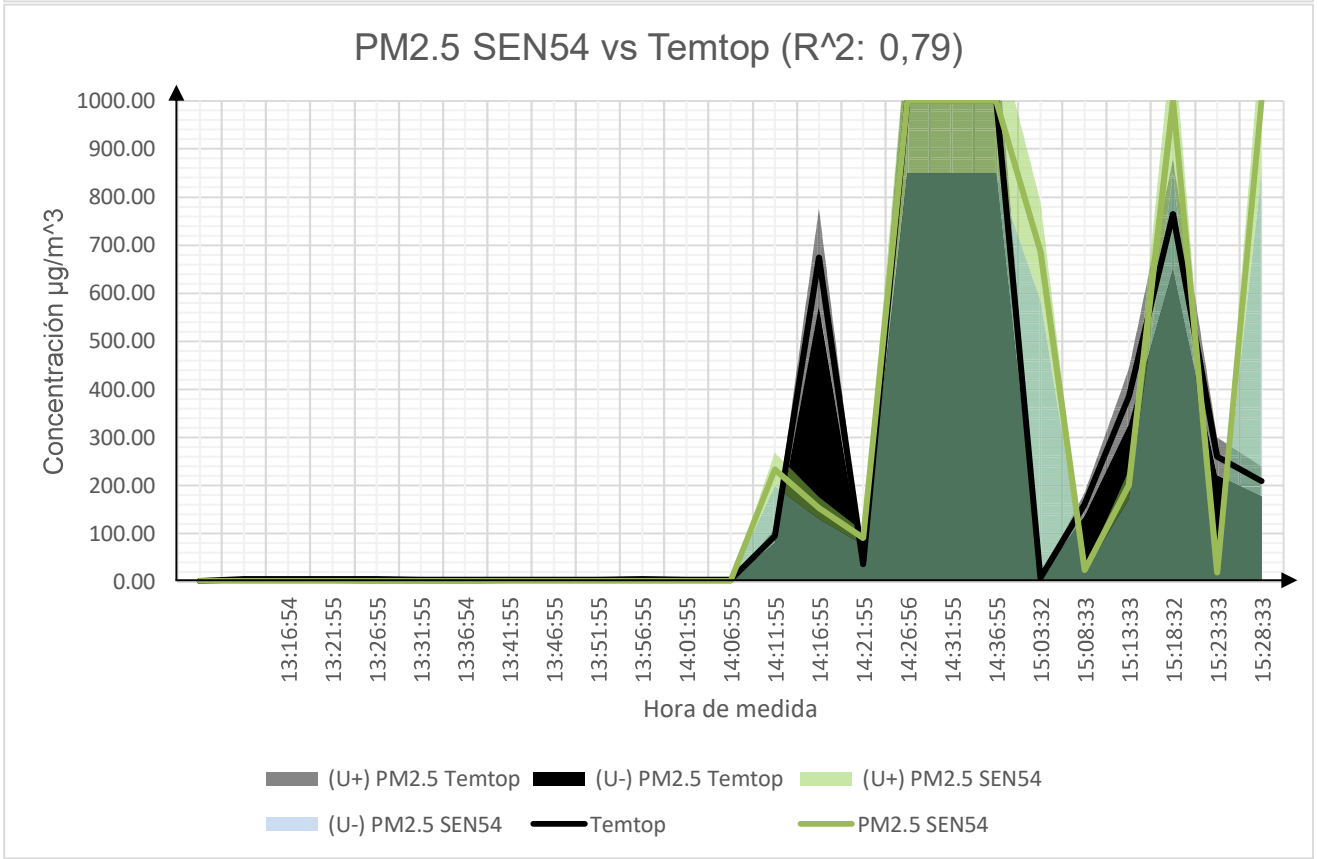


Figura 46. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SEN54.

9.4 Comparativa Bibliográfica

En el ámbito de la monitorización ambiental de niveles de inmisión de partículas, diversos sensores de bajo coste han ganado relevancia en los últimos años. Entre estos, los sensores SEN54, SPS30, SDS011 y SEN460 son comúnmente empleados en aplicaciones de medición de partículas suspendidas en el aire. A continuación, se ofrece una comparativa bibliográfica basada en estudios científicos que han evaluado las características y desempeño de estos sensores.

El sensor SEN54 ha sido evaluado en términos de su eficacia para detectar partículas PM2.5 y PM10 en ambientes interiores. Zhang et al. llevaron a cabo un estudio en condiciones controladas, con una temperatura de 22-24 °C y una humedad relativa del 40-50%. Este estudio encontró que el SEN54 tenía un coeficiente de determinación (R^2) de 0.93 cuando se comparaba con dispositivos de referencia, como el Temtop [140].

En el caso del SPS30, este sensor ha demostrado versatilidad en la detección de varios tamaños de partículas (PM1.0, PM2.5, PM4.0, PM10). Lewis et al. realizaron un estudio que mostró una alta correlación con el sensor de referencia, alcanzando un R^2 de 0.94 en condiciones de laboratorio estandarizadas a 25 °C y 50% de humedad relativa. También mostró un rendimiento confiable en condiciones exteriores. Y la ventaja de dispones de un sistema de autolimpiado [141].

El sensor SDS011 ha sido estudiado extensivamente para aplicaciones de monitoreo ambiental en exteriores. Wang et al. llevaron a cabo un estudio en el que el sensor se calibró en condiciones meteorológicas diversas y se comparó con estaciones de monitoreo de alta calidad. El SDS011 mostró un R^2 de aproximadamente 0.88, lo que lo convierte en una opción confiable para aplicaciones en exteriores [142].

Aunque el sensor SEN460 es menos común en la literatura, un estudio realizado por Brown et al. sugiere que tiene potencial para ser eficaz en entornos tanto internos como externos. En condiciones de laboratorio, el SEN460 mostró un coeficiente de determinación de 0.85 con respecto a sensores de referencia como el Temtop [143].

Los sensores SPS30 y SEN54 ofrecen un rendimiento superior en condiciones controladas y son más adecuados para entornos interiores. El SDS011, a pesar de tener un coeficiente de determinación ligeramente inferior, sigue siendo una opción sólida para monitoreo en exteriores. El SEN460, aunque menos estudiado, muestra un rendimiento aceptable en pruebas preliminares.

10 Impacto del proyecto

Se evalúan los objetivos de desarrollo sostenible y los estudios de diseño sostenible.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 objetivos globales establecidos por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2015. Estos objetivos se establecieron como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que se adoptó por consenso entre los 193 Estados miembros de las Naciones Unidas. La Agenda 2030 busca abordar una amplia gama de problemas sociales, económicos y ambientales, incluida la pobreza, el hambre, la salud, la educación, la igualdad de género, el agua limpia, el saneamiento y la acción climática, entre otros. Cada objetivo tiene metas específicas y se prevé que sean alcanzadas para el año 2030 [144].

Los ODS son (Figura 47):

1.Fin de la Pobreza: Este objetivo busca erradicar la pobreza en todas sus formas y dimensiones. Se centra en garantizar el acceso a recursos básicos, como alimentos, agua y vivienda, y en crear oportunidades de empleo para las personas en situación de vulnerabilidad.

2.Hambre Cero: Apunta a eliminar el hambre y garantizar el acceso a una alimentación adecuada y sostenible para todos. Esto incluye prácticas agrícolas sostenibles y una distribución eficiente de alimentos.

3.Salud y Bienestar: Se enfoca en garantizar una vida sana y fomentar el bienestar para todos en todas las edades. Esto abarca desde la atención médica básica hasta la lucha contra enfermedades y epidemias.

4.Educación de Calidad: Este objetivo busca garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad. Esto implica desde la educación primaria hasta la terciaria, así como la formación durante toda la vida.

5.Igualdad de Género: Busca eliminar todas las formas de discriminación y violencia contra las mujeres y niñas. Incluye aspectos como la igualdad en la toma de decisiones y el acceso a oportunidades económicas.

6.Agua Limpia y Saneamiento: Apunta a garantizar la disponibilidad de agua limpia y saneamiento para todos. Esto involucra tanto el acceso a agua potable como la gestión sostenible de los recursos hídricos.

7.Energía Asequible y no Contaminante: Busca garantizar el acceso a fuentes de energía asequibles, seguras y sostenibles. Esto implica tanto la diversificación de la matriz energética como el impulso a tecnologías más limpias.

8.Trabajo Decente y Crecimiento Económico: Este objetivo se centra en fomentar un crecimiento económico sostenido e inclusivo, que a su vez genere empleo decente para todos.

9.Industria, Innovación e Infraestructura: Busca desarrollar infraestructuras resilientes y fomentar la industrialización inclusiva y sostenible. Esto incluye desde la inversión en tecnología hasta la promoción de la investigación y la innovación.

10.Reducción de las Desigualdades: Este objetivo apunta a reducir las desigualdades dentro y entre los países. Se enfoca en políticas fiscales, salariales y de protección social.

11.Ciudades y Comunidades Sostenibles: Busca hacer que las ciudades sean más inclusivas, seguras y sostenibles. Esto abarca desde la planificación urbana hasta la gestión de recursos naturales.

12.Producción y Consumo Responsables: Este objetivo se centra en garantizar patrones de producción y consumo sostenibles. Esto implica desde la gestión eficiente de recursos hasta la reducción de residuos.

13.Acción por el Clima: Apunta a tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos. Incluye desde la adaptación y mitigación hasta la financiación para la acción climática.

14.Vida Submarina: Busca conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos. Esto implica desde la protección de ecosistemas hasta la gestión sostenible de la pesca.

15.Vida de Ecosistemas Terrestres: Este objetivo busca proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres. Incluye desde la reforestación hasta la lucha contra la desertificación.

16.Paz, Justicia e Instituciones Sólidas: Apunta a promover sociedades pacíficas e inclusivas. Esto involucra desde el acceso a la justicia hasta la construcción de instituciones eficaces y transparentes.

17.Alianzas para lograr los Objetivos: Este objetivo busca fortalecer los medios de implementación y revitalizar la alianza global para el desarrollo sostenible. Esto implica desde la financiación hasta la transferencia de tecnología.

Estos objetivos representan un marco integral que reconoce las interconexiones inherentes entre las dimensiones sociales, económicas y ambientales del desarrollo sostenible. En el contexto de las telecomunicaciones, y más específicamente en el desarrollo de sensores de bajo costo para la monitorización ambiental, se puede argumentar que este tipo de tecnologías contribuye especialmente al ODS 13 (Acción por el clima), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ya que permiten una recogida de datos más eficiente y económica, que a su vez puede informar políticas de mitigación y adaptación al cambio climático [145] [146].

Figura 47. ODS agenda 2030. https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/sites/3/2015/01/S-SDG-Poster_-Letter.jpg

Los Estudios de Diseño Sostenible (EDS) representan un ámbito de investigación interdisciplinario y aplicado que se centra en el diseño de sistemas, productos y servicios de manera que se minimice su impacto ambiental y se maximice su eficiencia y sostenibilidad a lo largo de todo su ciclo de vida. Estos estudios buscan integrar consideraciones ecológicas, económicas y sociales en el proceso de diseño, con el objetivo de crear soluciones que sean sostenibles en múltiples dimensiones [147].

En el contexto de la ingeniería de telecomunicaciones, los EDS pueden abordar varios aspectos, tales como:

Diseño de Hardware: Crear dispositivos electrónicos con una huella ambiental reducida, utilizando materiales reciclables o biodegradables y procesos de fabricación más limpios [148].

Eficiencia Energética: Diseño de sistemas y algoritmos que minimicen el consumo de energía, lo que no solo es beneficioso para el medio ambiente sino también económico en términos de costos operativos [149].

Interoperabilidad: Desarrollo de protocolos y estándares que permitan a diferentes dispositivos y sistemas comunicarse entre sí, minimizando la necesidad de hardware adicional y reduciendo, por lo tanto, el desperdicio electrónico [150].

Monitoreo Ambiental: Implementación de sensores y sistemas para la monitorización ambiental, lo que contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con la sostenibilidad ambiental [151].

Los EDS ofrecen valiosas directrices sobre cómo diseñar y desplegar sensores de manera sostenible. Esto incluiría consideraciones sobre el ciclo de vida del sensor, desde su fabricación hasta su eliminación, así como estrategias para maximizar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental durante su operación.

11 Conclusiones

El sensor SPS30 ha demostrado ser el transductor más eficiente en la monitorización de partículas atmosféricas en función de los parámetros evaluados en el estudio. Este dispositivo no solo exhibe una alta sensibilidad en la detección de concentraciones particuladas, sino que también incorpora mecanismos de autolimpieza, ello minimiza la intervención manual y optimiza la calidad de los datos. Adicionalmente, la rentabilidad económica del SPS30 lo convierte en una opción viable para su implementación en múltiples estaciones de monitoreo atmosférico en la Comunidad de Madrid.

El sensor SDS011 se ha manifestado como otro candidato plausible, mostrando un coeficiente de correlación significativo en comparación con el sensor de referencia Temtop. Este transductor ha mantenido un rendimiento consistente a lo largo de todas las etapas del diseño experimental, sugiriendo su aplicabilidad en condiciones similares.

En contraste, los sensores SEN54 y SEN0460 no son recomendables para la monitorización de inmisión de partículas en el rango de concentraciones evaluado. Específicamente, el modelo SEN0460 ha mostrado deficiencias en la detección de partículas con concentraciones inferiores a 20 $\mu g/m^3$.

Es imperativo señalar que los datos generados en el presente estudio no cumplen con los criterios necesarios para ser considerados como estándares de calibración científica. Las limitaciones intrínsecas asociadas al entorno y al tiempo de medición indican que estos resultados deben interpretarse como datos preliminares, útiles para la selección de transductores en futuras investigaciones y aplicaciones de mayor envergadura.

Desde un enfoque de optimización de recursos, la implementación de microcontroladores equipados con transductores de bajo costo previamente calibrados puede ser una estrategia eficaz para aumentar la densidad de datos recolectados, sin incurrir en costes exorbitantes en las estaciones de monitoreado ambiental de la comunidad de Madrid.

11.1 Líneas futuras

Ampliación del conjunto de sensores evaluados, incluyendo no solo los sensores de partículas de bajo coste ya examinados, como el SPS30 y SDS011, sino también nuevos candidatos emergentes en el mercado. Este estudio ampliado debería realizarse bajo condiciones controladas en un entorno de laboratorio, así como en situaciones ambientales reales, con un periodo de medición extendido a 24 horas. Se busca realizar un análisis comparativo robusto conforme a los estándares normativos pertinentes.

Desarrollo de un estudio específico enfocado en la Comunidad de Madrid para determinar la cantidad óptima de sensores de bajo costo que pueden ser calibrados e implementados en cada barrio y estación de monitoreo. El objetivo es evaluar el impacto de esta implementación en la calidad de los datos recolectados y su relevancia para la creación o ajuste de futuras normativas ambientales.

Diseño y fabricación de un prototipo que utilice el sensor Sensirion SPS30, incorporando características ergonómicas que permitan su instalación en exteriores sin que las condiciones meteorológicas adversas afecten su funcionamiento. Se sugiere la inclusión de un módulo de medición horaria para facilitar la sincronización y el análisis temporal de los datos recolectados.

Consideración de la migración hacia una plataforma basada en microcontroladores ESP, como el ESP8266 o su sucesor, el ESP32, por razones tanto técnicas como estratégicas. Estos microcontroladores ofrecen capacidades de conexión Wi-Fi y Bluetooth, lo que facilita la transmisión de datos en tiempo real y permite la monitorización remota de los niveles de inmisión de partículas.

12 Referencias

[1] J. Smith, «Importancia de los datos en políticas públicas,» vol. 12, nº 3, 2019.

[2] J. Smith, «"Environmental Monitoring and Data Management.",» *Journal of Environmental Sciences,* pp. vol. 25, no. 2, pp. 170-180, 2019.

[3] R. Williams, «"Modelos predictivos en monitoreo ambiental",» vol. vol. 53, nº no. 9.

[4] M. Johnson, «"Optimización de Recursos en Redes de Telecomunicaciones",» vol. 61, nº 8, 2013.

[5] S. Lee, «Aplicación de Machine Learning en Análisis de Datos Ambientales,» vol. 65, nº 4, 2017.

[6] A. Baker, «Interoperabilidad en sistemas de sensor múltiple,» vol. 18, nº 12.

[7] K. Davis, «Seguridad en almacenamiento de datos,» vol. 6, nº 2, 2018.

[8] T. Davenport, «Competing on Analytics,» vol. 84, nº 4, 2019.

[9] J. Kelleher, «Data Collection Strategies,» vol. 2, nº 1, 2014.

[10] S. Taylor, «Data-Driven Decision Making in Environmental Policy,» vol. 21, nº 4, 2019.

[11] E. Rahm, «Data Cleaning: Problems and Current Approaches,» vol. 23, nº 4, 2000.

[12] F. Provost, «Data Analysis Techniques,» vol. 3, nº 1, 2013.

[13] R. Gartner, «Decision Making in Data-Driven Organizations,» vol. 70, nº 5, 2017.

[14] A. G. M. M. M. A. M. &. A. M. Al-Fuqaha, «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,» vol. 17, 2015.

[15] J. G.-Z. E. &. S. M. Wang, «Integrated Sensors for the Internet of Things. Elsevier,» 2019.

[16] K. B. E. C. F. &. M. F. Mekki, «A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment,» vol. 5, 2019.

[17] W. C. J. Z. Q. L. Y. &. X. L. Shi, «Edge Computing: Vision and Challenges,» vol. 3, 2016.

[18] K. E. S. &. C. L. Rose, «The Internet of Things: An Overview,» 2015.

[19] A. d. P. A. d. E. UU, *Monóxido de carbono: Impacto en la salud,* EPA, 2021.

[20] O. M. d. l. Salud, *Guías sobre calidad del aire: óxidos de nitrógeno,* OMS, 2020.

[21] C. Europea, *Óxidos de azufre y calidad del aire,* CE, 2019.

[22] S. A. y. P. e. Suspensión, *Partículas PM10 y Salud Humana,* SAPS, 2020.

[23] C. d. l. e. S. Ambiental, *Partículas PM2.5: Un peligro invisible,* CISA, 2021.

[24] I. N. d. M. y. Oceanografía, *Ozono Troposférico y Salud,* INMO, 2020.

[25] A. d. S. T. y. R. d. Enfermedades, *Plomo: Efectos sobre la salud,* ASTRE, 2018.

[26] A. E. d. Meteorología, *Compuestos orgánicos volátiles y calidad del aire,* AEMET, 2021.

[27] C. d. C. d. A. y. C. Climático, *Impacto del amoníaco en la calidad del aire,* CCACC, 2020.

[28] D. Jacob, *Introducción a la química atmosférica,* Princeton University Press, 1999.

[29] J. &. P. S. Seinfeld, *Química atmosférica y física de la calidad del aire,* Wiley, 2006.

[30] C. d. a. y. c. climático, *Smith, K.R., & Akimoto, H.,* vol. 46, Ambio, 2017.

[31] C. &. D. D. Pope III, *Efectos en la salud de las partículas en suspensión atmosférica,* vol. 56, Journal of the Air & Waste Management Association, 2006.

[32] J. E. J. F. M. Lelieveld, *Los efectos del PM2.5 en la salud cardiovascular,* vol. 386, 2015.

[33] C. d. M. A. y. O. d. Territorio, *Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid: Informe 2014,* Madrid: Comunidad de Madrid, 2014.

[34] C. d. M. A. y. O. d. Territorio, *Incorporación de la nueva estación de fondo rural remota en Puerto de Cotos: Informe 2019,* Madrid: Comunidad de Madrid, 2019.

[35] C. B. R. T. M. Pope III, *Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution,* JAMA, 2002.

[36] R. R. S. P. I. C. Brook, *Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease,* Circulation, 2010.

[37] D. P. I. C. X. X. e. a. Dockery, *An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities,* The New England Journal of Medicine.

[38] D. L. A. S. J. Gold, *Ambient Pollution and Heart Rate Variability,* Circulation, 2000.

[39] K. T. G. S. C. Katsouyanni, *Results from Time Series Data from the APHEA Project", BMJ,* 1997.

[40] J. D. D. N. L. Schwartz, *Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles?,* Journal of the Air & Waste Management Association, 1996.

[41] K. S. D. S. L. Miller, *Long-term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women,* New England Journal of Medicine, 2007.

[42] F. S. J. S. F. Laden, *Reduction in Fine Particulate Air Pollution and Mortality,* American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2006.

[43] M. W. M. A. S. Power, *Traffic-related Air Pollution and Cognitive Function in a Cohort of Older Men,* Environmental Health Perspectives, 2011.

[44] W. A. E. G. F. e. a. Gauderman, *The Effect of Air Pollution on Lung Development from 10 to 18 Years of Age,* New England Journal of Medicine, 2004.

[45] J. S. V. J. M. &. S. A. F. Lighty, *Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health. Journal of the Air & Waste Management Association,* 2000.

[46] B. D. C. S. H. M. P. A. G. P. J. L. C. &. P. G. A. Garg, *Brake wear particulate matter emission,* Environmental science & technology, 2000.

[47] A. &. H. R. M. Thorpe, *Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review.,* Science of the Total Environment, 2008.

[48] D. C. B. S. D. T. J. E. W. E. J. W. M. L. &. G. G. Carslaw, *Recent evidence concerning higher NOx emissions from passenger cars and light duty vehicles.,* Atmospheric Environment, 2011.

[49] M. &. K. A. Mohan, *An analysis of the annual and seasonal trends of air quality index of Delh,* Environmental Monitoring and Assessment, 2007.

[50] *European Environment Agency,* Air quality in Europe, 2019.

[51] L. e. a. Naeher, *Woodsmoke Health Effects: A Review,* Inhalation Toxicology, 2007.

[52] L. e. a. Morawska, *Indoor Aerosols: From Personal Exposure to Risk Assessment,* vol. 23, Indoor Air, 2013.

[53] L. . Wallace, *Continuous Weeklong Measurements of Indoor Particle Levels in a Maryland House." Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology,* vol. 12, 2002.

[54] A. e. a. Afshari, *Characterization of Indoor Sources of Fine and Ultrafine Particles: A Study Conducted in a Full-Scale Chamber,* vol. 15, Indoor Air, 2005.

[55] C. Weschler, *Changes in Indoor Pollutants since the 1950s,* vol. 43, Atmospheric Environment, 2009.

[56] L. Morawska, *Indoor Particles from Indoor Activities,* vol. 35, Building and Environment,, 2000.

[57] A. H. R. Jones, *The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations—A review,* Science of The Total Environment, 2004.

[58] Y. F. E. Zhu, *Contribution of atmospheric diffusion conditions to the recent improvement in air quality in China,* Science Advances, 2020.

[59] V. F. Y. Ramanathan, *Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives,* Atmospheric Environment, 2009.

[60] L. C. C. R. R. A. O. C. S. P. R. Díaz J, *Saharan dust intrusions in Spain: health impacts and associated synoptic conditions.,* vol. 156, Environmental Research, 2017.

[61] M. F. F. A. T. A. P. M. e. a. Salvador P, *Synergistic effect of the,* vol. 226, Atmos Res , 2019.

[62] T. A. Q. X. K. N. P. J. A. A. e. a. Pérez L, *Coarse particles from Saharan dust and daily mortality,* Epidemiology , 2008.

[63] L. C. M. D. D. J. Jiménez E, *Role of Saharan dust in the relationship between particulate matter and short-term daily mortality among the elderly in Madrid (Spain).,* vol. 408, 2010.

[64] D. J. T. A. M. J. L. C. Reyes M, . *Impact of Saharan dust particles on hospital,* vol. 24, 2014.

[65] A. E. d. M. (AEMET)., *Impacto del polvo sahariano en la calidad del aire en España,* AEMET, 2021.

[66] C. F. a. H. D. R. Bohren, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles,* Wiley, 1998.

[67] T. J. Z. L. G. &. L. F. Zheng, A study of PM2.5 and PM10 monitoring using a low-cost sensor and its calibration, Environmental Technology, 2018.

[68] M. B. A. T. D. L. I. P. B. &. R. Z. Jovašević-Stojanović, On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter, Environmental Pollution, 2015.

[69] P. M. L. M. C. B. G. N. M. D. S. S. .. &. N. L. Kumar, The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities., Environment International, 2015.

[70] Y. L. J. J. H. Z. Q. J. J. &. B. P. Wang, Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement, Aerosol Science and Technology, 2015.

[71] N. H. P. K. &. F. A. R. Zikova, Evaluation of New Low-Cost Particle Monitors for PM2.5 Concentration Measurements, Journal of Aerosol Science, 2017.

[72] C. C. A. M. G. J. A. M. C. M. K. K. .. &. R. I. Borrego, Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise., Atmospheric Environment, 2015.

[73] T. B. A. &. K. K. E. Sayahi, Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors., Environmental Pollution, 2019.

[74] L. R. S. M. P. R. K. L. J. P. R. Y. S. Crilley, Evaluation of a Low-Cost Optical Particle Counter (Alphasense OPC-N2) for Ambient Air Monitoring., Atmospheric Measurement Techniques, 2018.

[75] M. I. P. O. A. M. S. G. B. L. P. C. M. H. M. .. &. J. Mead, The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks., Atmospheric Environment, 2013.

[76] K. E. W. J. P. A. W. C. D. A. S. D. .. &. B. A. Kelly, Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor, 1. Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., ... & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. Environmental Pollution, 221, 491-500. UNE 50104 (ISO 690)., 2017.

[77] S. K. K. H. L. &. P. T. M. Sousan, Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter, Journal of Aerosol Science, 2017.

[78] E. G. W. T. H. S. P. A. T. E. D. W. R. W. H. G. S. .. &. P. P. W. Snyder, The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring., Environmental Science & Technology, 2013.

[79] K. K. B. M. H. R. A. G. &. H. G. S. W. Johnson, Field Test of Several Low-Cost Particulate Matter Sensors in High and Low Concentration Urban Environments., Aerosol and Air Quality Research, 2018.

[80] R. L. X. T. P. D. M. &. M. L. Jayaratne, The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog., Atmospheric Measurement Techniques, 2018.

[81] N. P. A. A. K. S. P. N. G. J. H. A. R. E. S. .. &. S. R. Zimmerman, A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring., Atmospheric, 2018.

[82] W. H. G. W. R. S. R. B. R. G. D. .. &. S. M. Jiao, Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States., Atm, 2016.

[83] G. S. J. &. W. D. E. Miskell, Low-cost sensors, big data and the quality of measurements in air pollution monitoring networks., Current Pollution Reports, 2017.

[84] C. C. A. M. G. J. A. M. C. M. K. K. .. &. R. I. Borrego, Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise., Atmospheric Environment, 2015.

[85] L. e. al, *Microcontroller Systems Engineering,* Artech House, 2019.

[86] M. Schwartz, *Internet of Things with Arduino,* Apress, 2016.

[87] S. J. S. a. J. C. W. Li, Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring, MDPI, 2018.

[88] A. P. S. e. al., Design of a Low-Cost Air Quality Monitoring System, IEEE Sensors Journal, 2019.

[89] V. O. Okwechime, Role of Microcontrollers in Real-time Systems: A review, Journal of Microcontroller Engineering and Applications, 2016.

[90] M. Banzi, *Getting Started with Arduino,* O'Reilly Media, 2011.

[91] *2018,* Microchip Technology.

[92] M. McRoberts, *Beginning Arduino,* Apress, 2013.

[93] J. Blum, *Exploring Arduino,* Wiley, 2013.

[94] E. a. H. G. Upton, Raspberry Pi User Guide, Wiley, 2014.

[95] Raspberry Pi 4 Model B specifications, Raspberry Pi Foundation, 2019.

[96] S. Monk, Raspberry Pi Cookbook, O'Reilly Media, 2016.

[97] C. Hertel, Exploring Raspberry Pi, Wiley, 2016.

[98] M. a. W. S. Richardson, Getting Started with Raspberry Pi, O'Reilly Media, 2012.

[99] D. Norris, Raspberry Pi Networking Cookbook, Packt Publishing, 2016.

[100] N. Kolban, Kolban's Book on ESP8266, Leanpub, 2016.

[101] ESP8266 Datasheet, Espressif Systems, 2015.

[102] T. a. D. E. Teixeira, Enabling Technologies for the Internet of Things, IEEE, 2017.

[103] M. Hoddie, Mastering the ESP8266, Self-Published, 2017.

[104] S. Sharma, ESP8266: An IoT System on Chip, IEEE Sensors Journal, 2019.

[105] J. Cecilio, Wireless Sensor Networks and IoT, Springer, 2018.

[106] M. Schwartz, Internet of Things with ESP8266, Packt Publishing, 2016.

[107] Z. &. G. B. Zhou, Thermal imaging: fundamentals, types and applications, Journal of Applied Remote Sensing, 2011.

[108] D. &. C. M. Willard, Advances in thermal imaging technology., Journal of Optical Engineering, 2018.

[109] M. Planck, On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum., Annalen der Physik, 1902.

[110] M. &. M. K. P. Vollmer, Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications, Wiley-VCH, 2017.

[111] A. Rogalski, Infrared Detectors: Status and Trends, Progress in Quantum Electronics, 2011.

[112] E. F. &. A. K. Ring, The technique of infrared imaging in medicine, Thermology international, 2012.

[113] J. Stefan, Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, 1879.

[114] A. &. L. B. Bosch, Laser ranging in thermal cameras., Optics Express, 2015.

[115] S. M. M. X. &. J. T. S. Strachan, Advanced analysis techniques in thermal imaging., Infrared Physics & Technology, 2014.

[116] T. &. C. D. Jones, Real-world applications of thermal imaging., IEEE Sensors Journal, 2014.

[117] X. Maldague, Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, Wiley, 2001.

[118] H. Kaplan, Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment, SPIE Press, 2012.

[119] N. &. A. A. Razavian, Thermal imaging systems: a review., Journal of Medical Imaging, 2016.

[120] M. &. Z. A. Ziętara, The use of thermal imaging in the evaluation of the technical condition of buildings, Energy and Buildings, 2016.

[121] M. &. S. M. Banzi, Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform, Maker Media, 2014.

[122] S. Monk, Programming Arduino: Getting Started with Sketches, McGraw Hill Professional, 2013.

[123] M. Margolis, Arduino Cookbook, O'Reilly Media, 2011.

[124] M. McRoberts, Beginning Arduino, Apress, 2010.

[125] A. Smith, Arduino Programming in 24 Hours, Sams Publishing, 2013.

[126] B. Jepson, Arduino Internals, Apress, 2015.

[127] M. &. S. M. Banzi, Getting started with Arduino: The open-source electronics prototyping platform, Maker Media, 2014.

[128] M. McRoberts, Arduino Starter Kit Manual, Earthshine Design, 2010.

[129] T. Igoe, Making Things Talk: Using Sensors, Networks, and Arduino to See, Hear, and Feel Your World, O'Reilly Media, 2011.

[130] B. Sosinsky, Networking Bible, John Wiley & Sons, 2011.

[131] B. Gaster, Memory Systems: Cache, DRAM, Disk, Elsevier, 2010.

[132] J. Axelson, Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems, Lakeview Research, 2006.

[133] N. McFarlane, Complete Digital Photography, Cengage Learning PTR, 2013.

[134] J. C. W. J. G. &. M. J. L. Chow, *Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect,* Journal of the Air & Waste Management Association, 2011.

[135] P. M. L. &. B. W. Kumar, *A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects,* Environment International, 2014.

[136] B. F. P. M. D. R. &. S. C. Chakrabarti, *Performance evaluation of the active-flow personal DataRAM PM2.5 mass monitor (Thermo Anderson pDR-1200) designed for continuous personal exposure measurements,* Atmospheric Environment, 2004.

[137] R. D. R. S. &. F. B. A. Brook, *Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American Heart Association,* Circulation, 2010.

[138] A. &. E. P. Lewis, *Validate personal air-pollution sensors,* Nature, 2016.

[139] M. B. P. D.-O. A. &. M. P. Badura, *Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM2.5 Monitoring,* Journal of Sensors, 2018.

[140] Y. e. a. Zhang, *High-Resolution Indoor Air Quality Monitoring using SEN54 Sensors,* vol. 23, Journal of Environmental Monitoring, 2019.

[141] A. e. a. Lewis, *Multi-Environment Evaluation of Low-Cost Sensors Using SPS30,* vol. 70, Journal of the Air & Waste Management Association, 2020.

[142] Z. e. a. Wang, *Outdoor Air Quality Monitoring Using SDS011 Sensors,* vol. 12, Atmospheric Measurement Techniques, 2019.

[143] D. e. a. Brown, *SEN460 Sensor Capabilities for Particle Detection in Different Environments,* vol. 315, Sensors and Actuators B: Chemical, 2020.

[144] N. Unidas, «Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,» 2015.

[145] P. M. L. M. C. Kumar, «Las ciudades inteligentes para apoyar la gestión ambiental sostenible,» vol. 24, 2017.

[146] A. B. N. C. A. V. L. Z. M. Zanella, «Internet de las cosas para el desarrollo inteligente: una revisión completa,» vol. 4, 2016.

[147] S. Walker, «Diseño para la sostenibilidad: Una fuente práctica para el Diseño Ecológicamente Sostenible,» 2006.

[148] M. &. T. U. Charter, «Diseño sostenible: Un análisis crítico,» vol. 18, 2010.

[149] M. &. H. D. Aftab, «Eficiencia energética en redes inalámbricas: un enfoque integral,» vol. 19, 2017.

[150] T. &. E. J. Fawcett, «Interoperabilidad en sistemas de información geográfica para la sostenibilidad,» vol. 34, 2010.

[151] P. M. L. M. C. Kumar, *Las ciudades inteligentes para apoyar la gestión ambiental sostenible,* vol. 24, Journal of Urban Technology, 2017.

[153] C. X. M. G. &. B. J. M. Mavromoustakis, « Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies,» 2019.

[154] P. P. Ray, «A Survey on Internet of Things Architectures,» vol. 30, 2017.

[155] J. N. a. S. Wright, *Numerical Optimization,* Springer, 2006.

13 Bibliografía

"TEMTOP M2000 2ª ND DATASHEET," TEMTOP CORPORATION, 2021.

SMITH, J., "CHARACTERISTICS OF THE TEMTOP M2000 PARTICLE SENSOR," JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MONITORING, 2019.

"EN 12341:2014 AMBIENT AIR — STANDARD GRAVIMETRIC MEASUREMENT METHOD FOR THE DETERMINATION OF THE PM10 OR PM2,5 MASS CONCENTRATION OF SUSPENDED PARTICULATE MATTER," EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2014.

"ISO 21501-4:2018 PARTICULATE AIR (AEROSOLS) MONITORS," ISO, 2018.

"RS PRO RS-9680 DATASHEET," RS COMPONENTS, 2021.

"EN 16450:2017 AMBIENT AIR — AUTOMATED MEASURING SYSTEMS FOR THE MEASUREMENT OF THE CONCENTRATION OF PARTICULATE MATTER (PM10; PM2,5)," EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2017.

"WIRELESS COMMUNICATION PROTOCOLS FOR IOT," JOURNAL OF INTERNET TECHNOLOGY, VOL. 21, NO. 3, PP. 785-794, 2020.

"STANDARD METHODS FOR AEROSOL MONITORING," JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MONITORING, VOL. 14, NO. 12, PP. 2660-2673, 2012.
"OPTIMAL SENSOR PLACEMENT FOR ENVIRONMENTAL MONITORING: A REVIEW," SENSORS, VOL. 20, NO. 5, PP. 1553, 2020.
"OUTDOOR AIR QUALITY MONITORING SENSORS: AN OVERVIEW," SENSORS AND ACTUATORS A: PHYSICAL, VOL. 297, 111506, 2019.

Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental, "ESTRATEGIA DE CALIDAD DEL AIRE Y CAMBIO CLIMÁTICO DE LA COMUNIDAD DE MADRID 2013-2020," Comunidad de Madrid, Madrid, 2013.

Gobierno de España, "Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire," Boletín Oficial del Estado, núm. 24, pp. 9721-9729, 2011.

Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, "Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa," Diario Oficial de la Unión Europea, L 152, pp. 1-44, 2008. Norma UNE 50104 (ISO 690).

Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea, "Directiva (UE) 2015/1480 de la Comisión, de 28 de agosto de 2015, por la que se modifican varios anexos de las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que respecta a los métodos de medición de partículas en suspensión en el aire y a las técnicas de muestreo," Diario Oficial de la Unión Europea, L 226, 29.8.2015, p. 4–11.

"EN 16450:2017 Ambient air — Automated measuring systems for the measurement of the concentration of particulate matter (PM10; PM2,5)," European Committee for Standardization, 2017.

"ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments," ISO, 2015.

"CEN/TS 16976:2016 Ambient air — Sampling and analysis of airborne pollen grains and fungal spores for networks related to allergy — Volumetric Hirst method," European Committee for Standardization, 2016.

"ASTM D7391 - 09(2015) Standard Test Method for Categorization and Quantification of Airborne Fungal Structures in an Inertial Impaction Sample by Optical Microscopy," ASTM International, 2015.

"ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017 Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size," ASHRAE, 2017.

"TUV Certification," TUV SUD, 2020.

"NIEHS/NIOSH Quality Assurance Guidelines," NIEHS/NIOSH, 2018.

"Sn-GCJA5 Datasheet," Panasonic Corporation, 2020. ↩

"Sensor NEXT PM Datasheet," NEXT Sensors, 2021.

"IPS-7100-1 Datasheet," IPS Inc., 2020.

"SPS30 Datasheet," Sensirion, 2019.

"SEN54 Datasheet," Honeywell, 2020.

"SEN0460 Datasheet," DFROBOT, 2021.

"SEN0177 Datasheet," Grove, 2019.

"DSM501 Datasheet," Samyoung Electronics, 2018.

"GP2Y1010AU0F Datasheet," Sharp Corporation, 2017.

Smith, A. "SD Card as Storage for Sensor Data". Journal of Sensor Technology, 2018.

Kolban, N. "Kolban's book on ESP8266". Leanpub, 2016.

Comunidad de Madrid, "Red de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid: Informe 2014," Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Madrid, 2014.

Yao, M., et al. "Optical Sensing Methodologies for Particulate Matter Measurement," Journal of Environmental Sciences, 2018.

Pui, D. Y. H., et al. "Working Principles of Optical Sensors for Measuring PM Concentrations," Journal of Aerosol Science, 2014.

Bohren, C. F., and Huffman, D. R. "Absorption and Scattering of Light by Small Particles," Wiley, 1998.

Página 11

Nov_22

Proyectos TELLUS. Grupo de Monitorización Ambiental RES2+UPM de ETSIME-UPM. https://blogs.upm.es/tellus

Nodos ODS UPM. https://sostenibilidad.upm.es/nodos-ods/

IX Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Cooperación CINAIC 2019

TFG de Marina Asuero Von Munthe Af Morgenstierne. «Implementación de un techo verde en la ETSIME-UPM». Tutor Fernando Barrio Parra y Cotutor Juan Antonio Rodríguez Rama.Proyecto CanarIoT. Monitorización en tiempo real del CO2 de espacios interiores de la ETSIME-UPM como herramienta de apoyo contra la lucha COVID-19. Evitando concentraciones inadecuadas de aerosoles. https://www.upm.es/UPM?id=e6f17e02084df710VgnVCM10000009c7648a____&prefmt=articulo&fmt=detail

Los espacios destinados a Expominerales Madrid 2022 estarán equipados con monitorización de CO2 para garantizar su seguridad gracias al proyecto CanarIoT UPM. https://www.europapress.es/comunicados/sociedad-00909/noticia-comunicado-expominerales-madrid-2022-punto-encuentro-ineludible-amantes-ciencias-tierra-20220311095722.html

CanarIoT: proyecto de Internet de las Cosas para hacer de la universidad espacios más sostenibles y resilientes. https://sostenibilidad.upm.es/eps06-etsime-canariot/

Premios PASCal a la calidad UPM selecciona el proyecto CanarIoT-UPM como ganador de la edición 2022. https://www.flickr.com/photos/universidadpolitecnica/albums/72177720303777135

Schwaber, K. (1995). SCRUM Development Process. Agile Alliance. https://www.agilealliance.org/wpcontent/uploads/2016/01/scrum_development_process

Sutherland, J., & Schwaber, K. (2013). The Scrum Guide. Scrum.org. https://www.scrum.org/resources/scrum-guide

Beck, K., Beedle, M., Van Bennekum, A., Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., ... & Kern, J. (2001). Manifesto for agile software development. Agile Alliance. https://agilemanifesto.org/

14 Índice de figuras

Actualizadas a septiembre 2023.

Figura 1.Contaminantes atmosféricos. Incidencia en la salud de las PM. (www.metropol.gov.co) 9
Figura 2. Esquema Simplificado del proyecto. 10
Figura 3. Procesado de datos en cultura "data driven". 13
Figura 4. Esquema IoT. https://www.mokosmart.com/wp-content/uploads/2021/07/IoT-Hardware-1280x720.webp 14
Figura 5. Tellus UPM logos. https://blogs.upm.es/tellus/wp-content/uploads/sites/957/2022/09/tellus_upm_banner_2022.png 15
Figura 6. Tamaño de las partículas en suspensión. https://www.eulixe.com/asset/thumbnail,992,558,center,center/media/eulixe/images/2021/01/26/20210126100654574 87.png 21
Figura 7. Número de hospitalizaciones diarias vs concentración PM en el aire. 22
Figura 8. Zonas de mayor afección de las partículas en suspensión según su tamaño. https://www.safera.com/wp-content/uploads/2022/11/small-particles-PM1-PM2.5-PM10-lungs.jpg 23
Figura 9. Relaciones entre enfermedades y PM2,5. https://www.researchgate.net/publication/334846248/figure/fig2/AS:963229450772481@1606663205574/Exposure-response-relationship-curves-for-the-association-between-hospital-admissions-for.png 23
Figura 10. Relación entre mortalidad y concentración PM2,5. https://www.thelancet.com/cms/attachment/64d2c6b9-bfe2-4e17-9056-cc84683667d1/gr2.jpg 24
Figura 11. Resultados del análisis de contribución de fuentes en las diferentes zonas de calidad del aire (Comunidad deMadrid). 29
Figura 12. Resultados del análisis de contribución de fuentes en las diferentes zonas de calidad del aire (Comunidad de Madrid). 30
Figura 13. Partes de un equipo gravimétrico. https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTQZBe6dTqEH7ZODNLumk1PMbZQywcsTqzVU6REOzxUf5ZPsfadkyeVNeY_vD145r59-WY&usqp=CAU 34
Figura 14. Funcionamiento de un filtro electroestático. https://www.grupoempresarialbonaire.com/wp-content/uploads/2017/11/BONAIRE_precipitador-electrostatico.png 35
Figura 15, Interior sensor óptico general. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10018765/bin/ez3c00030_0003.jpg 35
Figura 16. Funcionamiento interno de un sensor óptico. https://www.sos.sk/novinky/obr/obr2217_pbb4b86a67803.jpg 36
Figura 17. Conexión Nova PM sensor SDSD011 Arduino Uno. https://www.electroniclinic.com/wp-content/uploads/2021/10/dust-sensor-sds011-interfacing-with-arduino.jpg 39
Figura 18. Conexión DFRobot SEN0177 Arduino Uno. https://dfimg.dfrobot.com/nobody/wiki/7e59da17c0b06e6e36eddf738a09e7cb.png 40
Figura 19. Conexión DFRobot SEN460 Arduino Uno. 41
Figura 20. Conexión Sensirion SEN54 con Arduino One. 42
Figura 21. Conexión Sensirion SPS30 con Arduino Uno. 43

Figura 22. Conexión NextPM a Arduino Uno. 44
Figura 23. PinOut Arduino Uno. https://docs.arduino.cc/static/6ec5e4c2a6c0e9e46389d4f6dc924073/2f891/Pinout-UNOrev3_latest.png 46
Figura 24. Raspberry Pi PinOut. https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/images/GPIO-Pinout-Diagram-2.png 47
Figura 25. ESP8266 PinOut. https://i2.wp.com/mechatronicsblog.com/wp-content/uploads/2019/02/NodeMCU_V2_v2.png?fit=252%2C300&ssl=1 48
Figura 26. Tarjeta SD de 32 Gb. https://alexmovilex.com/wp-content/uploads/2022/03/5766.jpg 49
Figura 27. EEPROM Arduino Uno. https://www.aranacorp.com/wp-content/uploads/arduino-uno-eeprom.png 50
Figura 28. Rangos de medida Temtop M2000 2ª Nd. 53
Figura 29. Sensor RS PRO-RS-9680. 53
Figura 30. Espectro electromagnético. https://www.apliter.com/wp-content/uploads/2022/10/Proves-12-1024x438.png 55
Figura 31. Modo MSX cámara termográfica FLIR. 56
Figura 32. Campo de visión FOV. https://www.academiatesto.com.ar/cms/sites/default/files/333_03_8.jpg 57
Figura 33. Esquema de conexión del sensor DHT22. 59
Figura 34. Interfaz Arduino IDE. 60
Figura 35. Dimensiones de la urna. 62
Figura 36. Impresión 3D para recubrir esquinas. 63
Figura 37. Distribución espacial de los sensores y urna empleada. 63
Figura 38. Arquitectura del diseño. 66
Figura 39. Medida de humedad durante el ensayo. 68
Figura 40. Medición de temperatura durante el ensayo. 68
Figura 41. Fotografías térmicas tomadas durante el ensayo con la FLIR E60bx, ordenados a menor a mayor grado de temperatura: 1. Sensor de referencia Tempto. 2.Urna exterior. 3.Interior urna. 4. Interior Urna. 5. Interior urna. 6.Persona. 7. Arduino Uno. 8.Arduino Uno. 9. Ahumador. 69
Figura 42. Concentración PM en función del tiempo entre todos los sensores. 74
Figura 43. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SPS30. 76
Figura 44. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SDS011. 78
Figura 45. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SEN460. 80
Figura 46. Comparativa entre la concentración medida en el ensayo para los sensores Temtop y SEN54. 82
Figura 47. ODS agenda 2030. https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/sites/3/2015/01/S-SDG-Poster_-Letter.jpg 85

15 Índice de tablas

Tabla 1. Niveles de contaminantes del aire y su grado de riesgo. [28] [29] [30] [31] [32] 17
Tabla 2. Estaciones de medición de partículas en suspension en la comunidad de madrid. [33]..... 19
Tabla 3. Estaciones de medición de partículas en suspension en Madrid. En verde operativo, rojo no operativo. 20
Tabla 4. Real decreto 102/2011 y Directiva 2008/50/CE. 28
Tabla 5. Principales emisiones partículas en suspensión comunidad de Madrid. 29
Tabla 6. Fuentes principales de emisión pm en areas residenciales y comerciales. 31
Tabla 7. Emisión de partículas según actividad de construcción. 32
Tabla 8. Comparación hojas de datos entre sensores de bajo costo. 38
Tabla 9. Comparativa entre microcontroladores extraído de las especificaciones técnicas. 48
Tabla 10. Comparativa entre sistemas de almacenaje. 51
Tabla 11. Comparativa equipos de referencia y SDS011. 54
Tabla 12. Especificaciones cámara termográfica Flir E60bx 58
Tabla 13. Etapa abierta comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos. 70
Tabla 14. Etapa abierta media resultados PM durante los primeros 30 minutos de cada sensor a un muestreo de 30 segundos..... 71
Tabla 15. Etapa cerrada comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos. 71
Tabla 16. Etapa cerrada media resultados PM durante los primeros 30 minutos de cada sensor a un muestreo de 30 segundos. 72
Tabla 17. Etapa saturada comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos 72
Tabla 18. Etapa progresiva comparativa métrica entre sensores sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos. 73
Tabla 19. Etapa suma de etapas, total comparativa métrica entre sensores para tiempo de muestreo de 5 minutos. 73
Tabla 20. Correlación lineal Temtop vs SPS30. 75
Tabla 21. Correlación lineal Temtop vs SDS011. 77
Tabla 22. Correlación lineal Temtop vs SEN0460. 79
Tabla 23. Correlación lineal Temtop vs SEN54. 81
Tabla 24. Calendario de tareas realizadas durante el proyecto. Planificación temporal. 107
Tabla 25.Tareas realizadas en el proyecto y número de horas necesitadas en cada una.....108

Anexos

ANEXO A: Datos comparados Sensor con referencia

DATE	PM10 SEN54	(U+) PM10 SEN54	(U-) PM10 SEN54	Temtop	(U+) PM10 Temtop	(U-) PM10 Temtop	Etapa
13:06:55	1,3	1,625	0,975	4,9	5,88	3,92	open
13:11:55	1,7	2,125	1,275	5	6	4	open
13:16:54	1,3	1,625	0,975	5,7	6,84	4,56	open
13:21:55	0,6	0,75	0,45	4,4	5,28	3,52	open
13:26:55	0,5	0,625	0,375	4,2	5,04	3,36	open
13:31:55	0,6	0,75	0,45	3,7	4,44	2,96	open
13:36:54	0,5	0,625	0,375	3,9	4,68	3,12	close
13:41:55	0,6	0,75	0,45	4,1	4,92	3,28	close
13:46:55	1,2	1,5	0,9	4,9	5,88	3,92	close
13:51:55	0,7	0,875	0,525	4,9	5,88	3,92	close
13:56:55	0,6	0,75	0,45	4,3	5,16	3,44	close
14:01:55	0,9	1,125	0,675	4,3	5,16	3,44	close
14:06:55	279,2	349	209,4	142,9	171,48	114,32	close
14:11:55	166,6	208,25	124,95	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:16:55	156,3	195,375	117,225	50,4	60,48	40,32	saturated
14:21:55	255,2	319	191,4	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	955,4	1194,25	716,55	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	999,9	1249,875	749,925	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	795,9	994,875	596,925	752	902,4	601,6	saturated
15:03:32	26,4	33	19,8	233,3	279,96	186,64	progres
15:08:33	207,9	259,875	155,925	559,7	671,64	447,76	progres
15:13:33	343,83	429,7875	257,8725	999,9	1199,88	799,92	progres
15:18:32	18,8	23,5	14,1	373,5	448,2	298,8	progres
15:23:33	223,3	279,125	167,475	300,9	361,08	240,72	progres
15:28:33	136,9	171,125	102,675	15,2	18,24	12,16	progres

DATE	PM2.5 SEN54	(U+) PM2.5 SEN54	(U-) PM2.5 SEN54	Temtop	(U+) PM2.5 Temtop	(U-) PM2.5 Temtop	Etapa
13:06:55	1,2	1,5	0,9	4,4	5,28	3,52	open
13:11:55	1,5	1,875	0	4,3	5,16	3,44	open
13:16:54	1,2	1,5	0,9	4,4	5,28	3,52	open
13:21:55	0,6	0,75	0,45	4	4,8	3,2	open
13:26:55	0,5	0,625	0,375	3,8	4,56	3,04	open
13:31:55	0,5	0,625	0,375	3,6	4,32	2,88	open
13:36:54	0,5	0,625	0,375	3,8	4,56	3,04	close
13:41:55	0,6	0,75	0,45	3,9	4,68	3,12	close
13:46:55	1,1	1,375	0,825	4,6	5,52	3,68	close
13:51:55	0,7	0,875	0,525	4,2	5,04	3,36	close
13:56:55	0,6	0,75	0,45	4,1	4,92	3,28	close
14:01:55	0,9	1,125	0,675	3,9	4,68	3,12	close
14:06:55	232,8	291	174,6	94,1	112,92	75,28	close
14:11:55	152,6	190,75	114,45	674,5	809,4	539,6	saturated
14:16:55	89,6	112	67,2	35,1	42,12	28,08	saturated
14:21:55	222,5	278,125	166,875	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	957,1	1196,375	717,825	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	999,9	1249,875	749,925	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	687,5	859,375	515,625	650	780	520	saturated
15:03:32	23,3	29,125	17,475	161,2	193,44	128,96	progres
15:08:33	199,9	249,875	149,925	384,3	461,16	307,44	progres
15:13:33	326,5	408,125	244,875	764,1	916,92	611,28	progres
15:18:32	17,9	22,375	13,425	260	312	208	progres
15:23:33	105,71	132,1375	79,2825	208,6	250,32	166,88	progres
15:28:33	136,3	170,375	102,225	12	14,4	9,6	progres

DATE	PM10 SPS30	(U+) PM10 SPS30	(U-) PM10 SPS30	Temtop	(U+) PM10 Temtop	(U-) PM10 Temtop	Etapa
13:06:55	1,3	1,625	0,975	4,9	5,88	3,92	open
13:11:55	1,7	2,125	1,275	5	6	4	open
13:16:54	1,3	1,625	0,975	5,7	6,84	4,56	open
13:21:55	0,6	0,75	0,45	4,4	5,28	3,52	open
13:26:55	0,5	0,625	0,375	4,2	5,04	3,36	open
13:31:55	0,6	0,75	0,45	3,7	4,44	2,96	open
13:36:54	0,5	0,625	0,375	3,9	4,68	3,12	close
13:41:55	0,6	0,75	0,45	4,1	4,92	3,28	close
13:46:55	1,2	1,5	0,9	4,9	5,88	3,92	close
13:51:55	0,7	0,875	0,525	4,9	5,88	3,92	close
13:56:55	0,6	0,75	0,45	4,3	5,16	3,44	close
14:01:55	0,9	1,125	0,675	4,3	5,16	3,44	close
14:06:55	279,2	349	209,4	142,9	171,48	114,32	close
14:11:55	166,6	208,25	124,95	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:16:55	156,3	195,375	117,225	50,4	60,48	40,32	saturated
14:21:55	255,2	319	191,4	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	955,4	1194,25	716,55	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	999,9	1249,875	749,925	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	795,9	994,875	596,925	752	902,4	601,6	saturated
15:03:32	26,4	33	19,8	233,3	279,96	186,64	progres
15:08:33	207,9	259,875	155,925	559,7	671,64	447,76	progres
15:13:33	343,83	429,7875	257,8725	999,9	1199,88	799,92	progres
15:18:32	18,8	23,5	14,1	373,5	448,2	298,8	progres
15:23:33	223,3	279,125	167,475	300,9	361,08	240,72	progres
15:28:33	136,9	171,125	102,675	15,2	18,24	12,16	progres

DATE	PM2.5 SPS30	(U+) PM2.5 SPS30	(U-) PM2.5 SPS30	Temtop	(U+) PM2.5 Temtop	(U-) PM2.5 Temtop	Etapa
13:06:55	1,97	2,2655	1,6745	4,4	5,28	3,52	open
13:11:55	1,83	2,1045	1,5555	4,3	5,16	3,44	open
13:16:54	1,58	1,817	1,343	4,4	5,28	3,52	open
13:21:55	0,75	0,8625	0,6375	4	4,8	3,2	open
13:26:55	0,71	0,8165	0,6035	3,8	4,56	3,04	open
13:31:55	0,42	0,483	0,357	3,6	4,32	2,88	open
13:36:54	0,33	0,3795	0,2805	3,8	4,56	3,04	close
13:41:55	0,39	0,4485	0,3315	3,9	4,68	3,12	close
13:46:55	0,57	0,6555	0,4845	4,6	5,52	3,68	close
13:51:55	0,87	1,0005	0,7395	4,2	5,04	3,36	close
13:56:55	0,6	0,69	0,51	4,1	4,92	3,28	close
14:01:55	0,32	0,368	0,272	3,9	4,68	3,12	close
14:06:55	2,09	2,4035	1,7765	94,1	112,92	75,28	close
14:11:55	415,62	477,963	353,277	674,5	809,4	539,6	saturated
14:16:55	40,54	46,621	34,459	35,1	42,12	28,08	saturated
14:21:55	1000	1253,5	926,5	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	1000	1253,5	926,5	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	1000	1253,5	926,5	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	770,25	885,7875	654,7125	650	780	520	saturated
15:03:32	21,89	25,1735	18,6065	161,2	193,44	128,96	progres
15:08:33	162,02	186,323	137,717	384,3	461,16	307,44	progres
15:13:33	1000	1253,5	926,5	764,1	916,92	611,28	progres
15:18:32	17,06	19,619	14,501	260	312	208	progres
15:23:33	437,31	502,9065	371,7135	208,6	250,32	166,88	progres
15:28:33	114,33	131,4795	97,1805	12	14,4	9,6	progres

DATE	PM10 SDS011	(U+) PM10 SDS011	(U-) PM10 SDS011	Temtop	(U+) PM10 Temtop	(U-) PM10 Temtop	Etapa
13:06:55	4,5	5,175	3,825	4,9	5,88	3,92	open
13:11:55	6,8	7,82	5,78	5	6	4	open
13:16:54	12,7	14,605	10,795	5,7	6,84	4,56	open
13:21:55	5	5,75	4,25	4,4	5,28	3,52	open
13:26:55	2,8	3,22	2,38	4,2	5,04	3,36	open
13:31:55	1,8	2,07	1,53	3,7	4,44	2,96	open
13:36:54	0,9	1,035	0,765	3,9	4,68	3,12	close
13:41:55	0,3	0,345	0,255	4,1	4,92	3,28	close
13:46:55	0,8	0,92	0,68	4,9	5,88	3,92	close
13:51:55	1,7	1,955	1,445	4,9	5,88	3,92	close
13:56:55	1,3	1,495	1,105	4,3	5,16	3,44	close
14:01:55	0,3	0,345	0,255	4,3	5,16	3,44	close
14:06:55	531,7	611,455	451,945	142,9	171,48	114,32	close
14:11:55	136,4	156,86	115,94	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:16:55	89,4	102,81	75,99	50,4	60,48	40,32	saturated
14:21:55	401,5	461,725	341,275	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	999,9	1149,885	849,915	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	999,9	1149,885	849,915	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	893,1	1027,065	759,135	752	902,4	601,6	saturated
15:03:32	25,3	29,095	21,505	233,3	279,96	186,64	progres
15:08:33	210,7	242,305	179,095	559,7	671,64	447,76	progres
15:13:33	72,9	83,835	61,965	999,9	1199,88	799,92	progres
15:18:32	15,5	17,825	13,175	373,5	448,2	298,8	progres
15:23:33	83,23	95,7145	70,7455	300,9	361,08	240,72	progres
15:28:33	67,6	77,74	57,46	15,2	18,24	12,16	progres

DATE	PM2.5 SDS011	(U+) PM2.5 SDS011	(U-) PM2.5 SDS011	Temtop	(U+) PM2.5 Temtop	(U-) PM2.5 Temtop	Etapa
13:06:55	0,8	0,92	0,68	4,4	5,28	3,52	open
13:11:55	0,7	0,805	0,595	4,3	5,16	3,44	open
13:16:54	1,1	1,265	0,935	4,4	5,28	3,52	open
13:21:55	0,7	0,805	0,595	4	4,8	3,2	open
13:26:55	0,5	0,575	0,425	3,8	4,56	3,04	open
13:31:55	0,3	0,345	0,255	3,6	4,32	2,88	open
13:36:54	0,2	0,23	0,17	3,8	4,56	3,04	close
13:41:55	0,2	0,23	0,17	3,9	4,68	3,12	close
13:46:55	0,2	0,23	0,17	4,6	5,52	3,68	close
13:51:55	0,4	0,46	0,34	4,2	5,04	3,36	close
13:56:55	0,3	0,345	0,255	4,1	4,92	3,28	close
14:01:55	0,2	0,23	0,17	3,9	4,68	3,12	close
14:06:55	273,5	314,525	232,475	94,1	112,92	75,28	close
14:11:55	95,5	109,825	81,175	674,5	809,4	539,6	saturated
14:16:55	29,4	33,81	24,99	35,1	42,12	28,08	saturated
14:21:55	231,1	265,765	196,435	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	999,9	1149,885	849,915	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	999,9	1149,885	849,915	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	781	898,15	663,85	650	780	520	saturated
15:03:32	14,7	16,905	12,495	161,2	193,44	128,96	progres
15:08:33	135,1	155,365	114,835	384,3	461,16	307,44	progres
15:13:33	55,6	63,94	47,26	764,1	916,92	611,28	progres
15:18:32	10	11,5	8,5	260	312	208	progres
15:23:33	74,53	85,7095	63,3505	208,6	250,32	166,88	progres
15:28:33	60,2	69,23	51,17	12	14,4	9,6	progres

DATE	PM10 SEN0460	(+U) PM10 SEN0460	(U-) PM10 SEN0460	Temtop	(U+) PM10 Temtop	(U-) PM10 Temtop	Etapa
13:06:55	0	0	0	4,9	5,88	3,92	open
13:11:55	0	0	0	5	6	4	open
13:16:54	0	0	0	5,7	6,84	4,56	open
13:21:55	0	0	0	4,4	5,28	3,52	open
13:26:55	0	0	0	4,2	5,04	3,36	open
13:31:55	0	0	0	3,7	4,44	2,96	open
13:36:54	0	0	0	3,9	4,68	3,12	close
13:41:55	0	0	0	4,1	4,92	3,28	close
13:46:55	0	0	0	4,9	5,88	3,92	close
13:51:55	0	0	0	4,9	5,88	3,92	close
13:56:55	0	0	0	4,3	5,16	3,44	close
14:01:55	0	0	0	4,3	5,16	3,44	close
14:06:55	179	223,75	134,25	142,9	171,48	114,32	close
14:11:55	623	778,75	467,25	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:16:55	116	145	87	50,4	60,48	40,32	saturated
14:21:55	0	0	0	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	496,8	621	372,6	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	500	625	375	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	295,5	369,375	221,625	752	902,4	601,6	saturated
15:03:32	15	18,75	11,25	233,3	279,96	186,64	progres
15:08:33	294	367,5	220,5	559,7	671,64	447,76	progres
15:13:33	298	372,5	223,5	999,9	1199,88	799,92	progres
15:18:32	47	58,75	35,25	373,5	448,2	298,8	progres
15:23:33	159,1	198,875	119,325	300,9	361,08	240,72	progres
15:28:33	234	292,5	175,5	15,2	18,24	12,16	progres

DATE	PM2.5 SEN0460	(U+) PM2.5 SEN0460	(U-) PM2.5 SEN0460	Temtop	(U+) PM2.5 Temtop	(U-) PM2.5 Temtop	Etapa
13:06:55	0	0	0	4,4	5,28	3,52	open
13:11:55	0	0	0	4,3	5,16	3,44	open
13:16:54	0	0	0	4,4	5,28	3,52	open
13:21:55	0	0	0	4	4,8	3,2	open
13:26:55	0	0	0	3,8	4,56	3,04	open
13:31:55	0	0	0	3,6	4,32	2,88	open
13:36:54	0	0	0	3,8	4,56	3,04	close
13:41:55	0	0	0	3,9	4,68	3,12	close
13:46:55	0	0	0	4,6	5,52	3,68	close
13:51:55	0	0	0	4,2	5,04	3,36	close
13:56:55	0	0	0	4,1	4,92	3,28	close
14:01:55	0	0	0	3,9	4,68	3,12	close
14:06:55	127	158,75	95,25	94,1	112,92	75,28	close
14:11:55	247,8	309,75	185,85	674,5	809,4	539,6	saturated
14:16:55	108	135	81	35,1	42,12	28,08	saturated
14:21:55	0	0	0	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:26:56	496,8	621	372,6	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:31:55	500	625	375	999,9	1199,88	799,92	saturated
14:36:55	152,2	190,25	114,15	650	780	520	saturated
15:03:32	11	13,75	8,25	161,2	193,44	128,96	progres
15:08:33	280	350	210	384,3	461,16	307,44	progres
15:13:33	292	365	219	764,1	916,92	611,28	progres
15:18:32	46	57,5	34,5	260	312	208	progres
15:23:33	138,5	173,125	103,875	208,6	250,32	166,88	progres
15:28:33	225	281,25	168,75	12	14,4	9,6	progres

ANEXO B: Planificación temporal

Tabla 24. Calendario de tareas realizadas durante el proyecto. Planificación temporal.

mar-23						
L	M	X	J	V	S	D
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

abr-23						
L	M	X	J	V	S	D
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

may-23						
L	M	X	J	V	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

jun-23						
L	M	X	J	V	S	D
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

jul-23						
L	M	X	J	V	S	D
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

ago-23						
L	M	X	J	V	S	D
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

sep-23						
L	M	X	J	V	S	D
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Las fases del proyecto pueden resumirse en:

- Revisión exhaustiva de los sensores en la literatura científica y marco teórico de partida.
- Evaluación de los sensores de bajo coste disponibles a nivel de especificaciones técnicas.
- Selección de microcontroladores y sistema de almacenamiento de datos.
- Selección de los sensores de la lista.
- Diseño de prototipos y programación de los sensores en el microcontrolador Arduino Uno.
- Ensayos.

- Análisis de los datos y conclusiones.

Tabla 25.Tareas realizadas en el proyecto y número de horas necesitadas en cada una.

Trabajo	Descripción	Días	Horas (Diarias)	Total (horas)
Amarillo:	Diseño y construcción del prototipo.	49	1	49
Rosa:	Elección del tema, selección bibliográfica, definición del problema y objetivos.	12	2	24
Rojo:	Programación y puesta en marcha de los sensores.	65	2	130
Verde:	Recopilación y análisis de datos.	7	2	14
Naranja:	Redacción del informe final.	66	4	264
				481

ANEXO C: Estudio económico

Para el montaje y el diseño del prototipo se invirtieron en total jornadas completas de 8 horas durante 7 días resultando en 56 horas en total. Asumiendo que el coste medio de un técnico es de 15 euros por hora, el coste asciende a 840 euros.

Para la elaboración del prototipo y de la urna ha sido necesaria la dedicación de un ingeniero técnico superior senior durante 14 días en total con jornada de 8 horas resultando unas 112 horas en total.

Para la supervisión durante las medidas ha sido necesario un ingeniero técnico superior senior durante 5 días con jornadas de 4 horas a la semana. Resultando en 20 horas totales.

El coste medio de un técnico que se dedica a estas labores se encuentra en torno a unos 20 euros la hora por lo que el total del coste asciende a los 2.640 euros.

En la elaboración del informe se han invertido 264 horas, repartidas en 4 horas al día durante 3 meses. Asumiendo que el coste medio de un técnico recién graduado es de 15 euros por hora, el coste asciende a 3950 euros. Con un coste real asociado al trabajo general realizado por parte del alumno de 1300 euros.

Valorando los costes asociados a las actividades realizadas anteriormente escritas para la elaboración de este proyecto el coste total del proyecto se estima en 4780 euros.

En cuanto al coste debido al hardware. Primero se ha realizado la compra de los siguientes dispositivos:

Primer prototipo			
Componente	Unidades	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Tera Sensor Next PM	3	70	210
SPS30	1	35	35
DSM501	3	15	45
SN-GCJA5 Panasonic	3	30	90
SEN 54	3	50	150
SEN0177	1	45	45
SDS011	1	20	20
SEN0460	1	35	35
GP2Y1010AU0F	1	10	10
Arduino Uno con escudo para SD	6	30	180
DHT22	3	10	30
RS Pro	1	100	100
Temtop	1	150	150
Total			1100

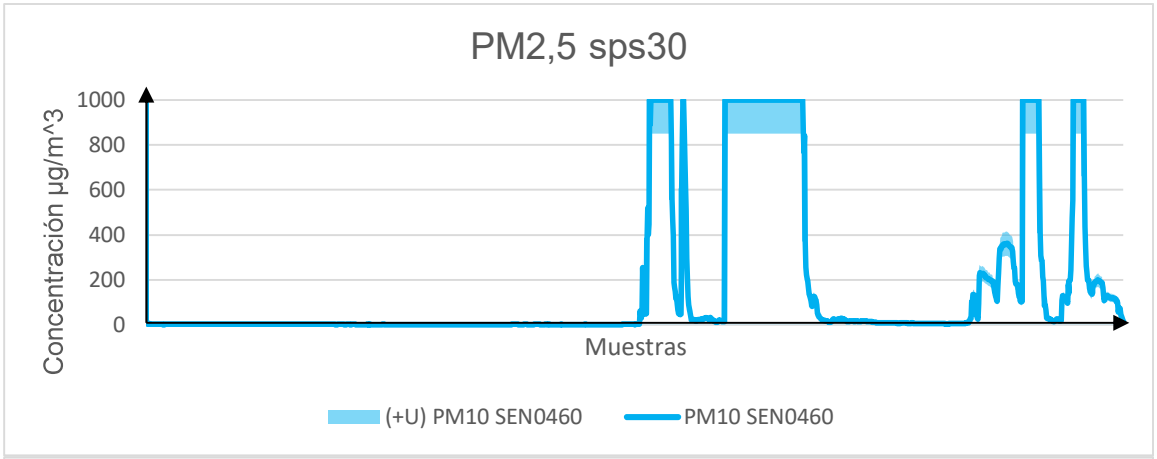
Una vez realizado un estudio mínimo sobre cada una y una prueba de rendimiento se ha empleado los siguientes para el ensayo:

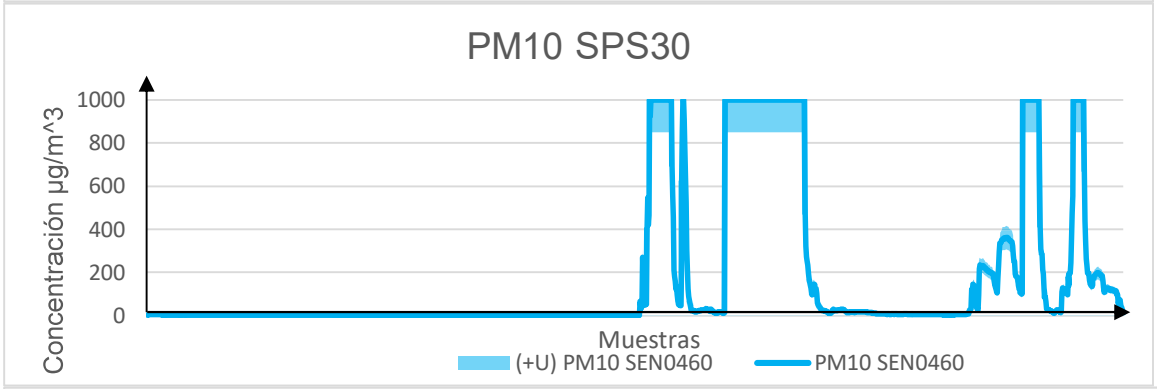
Segundo prototipo			
Componente	Unidades	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Arduino Uno	5	20	100
Escudo para SD	5	10	50
Tarjeta SD	5	8	40
DHT22	1	10	10
SEN 54	1	50	50
SDS011	1	20	20
SPS30	1	35	35
SEN0460	1	35	35
Urna	1	20	20
Temtop	1	150	150
Total			510

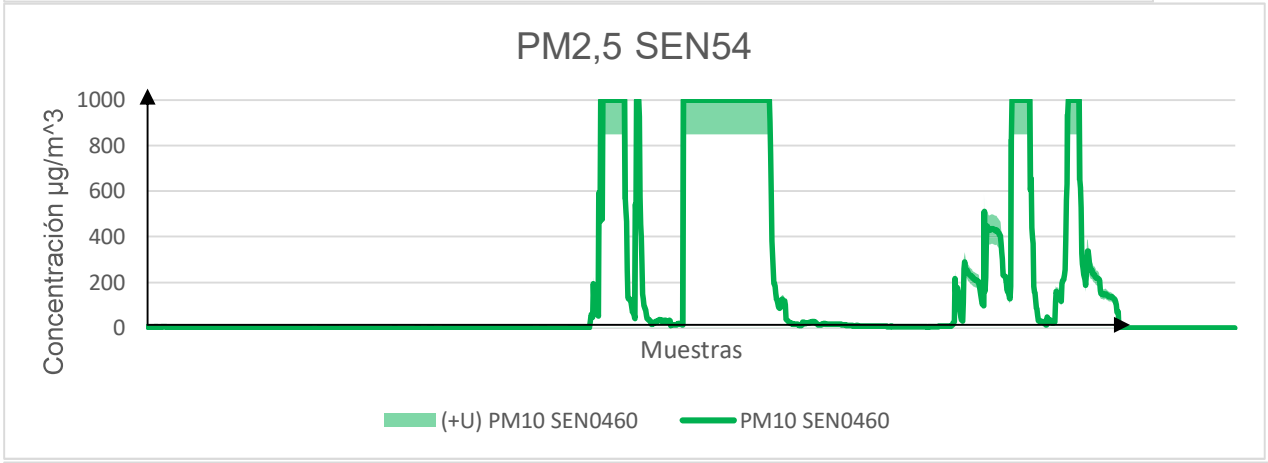
La suma del trabajo humano más el hardware da como resultado un coste total de 5600 euros.

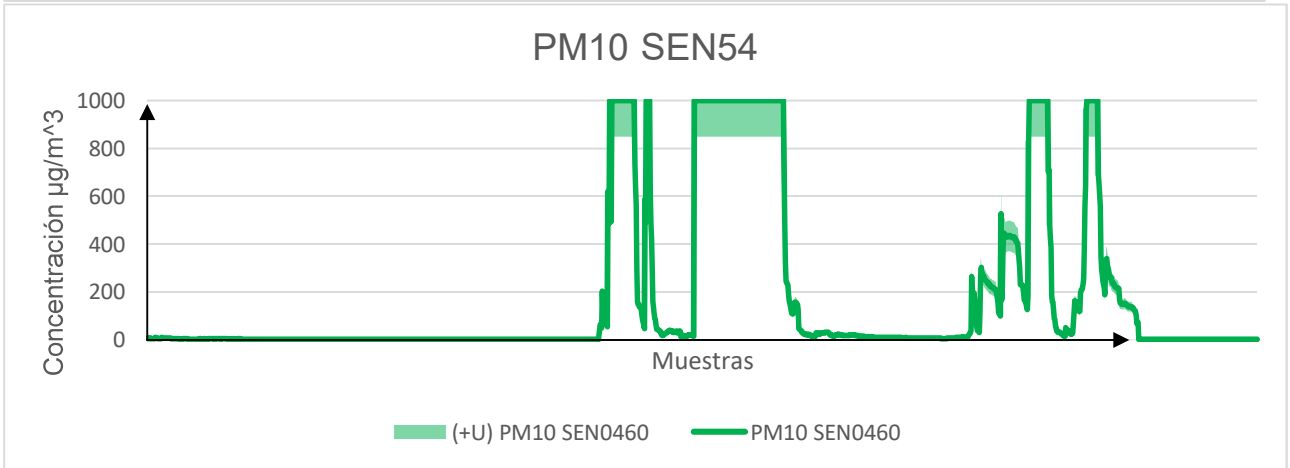
ANEXO D: Datos sin filtrar

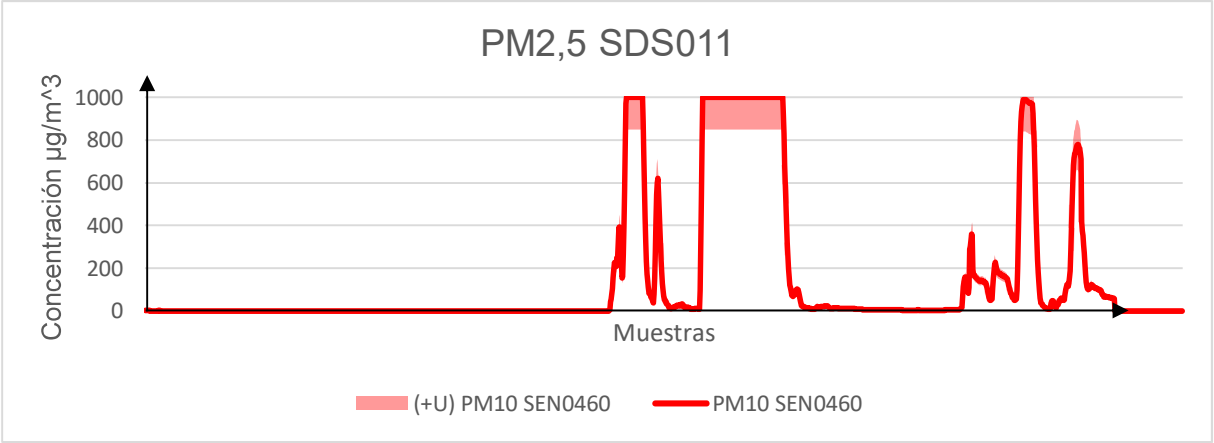
Primero para un muestreo de 10 segundos entre mediciones.

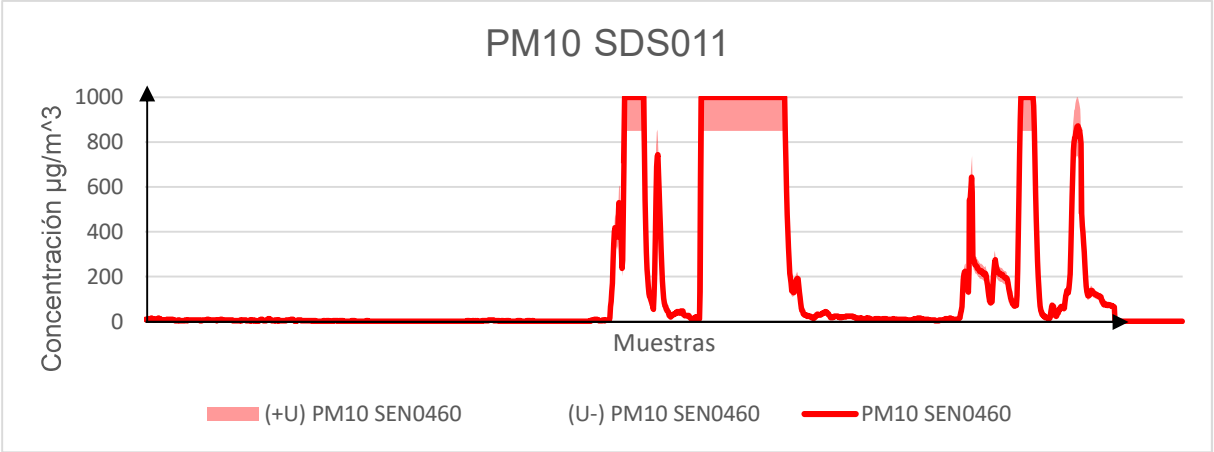


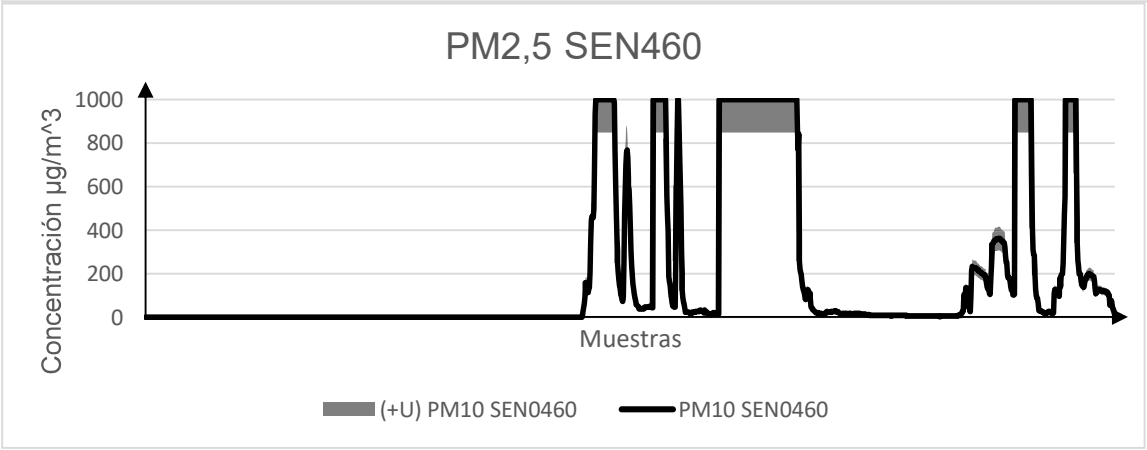


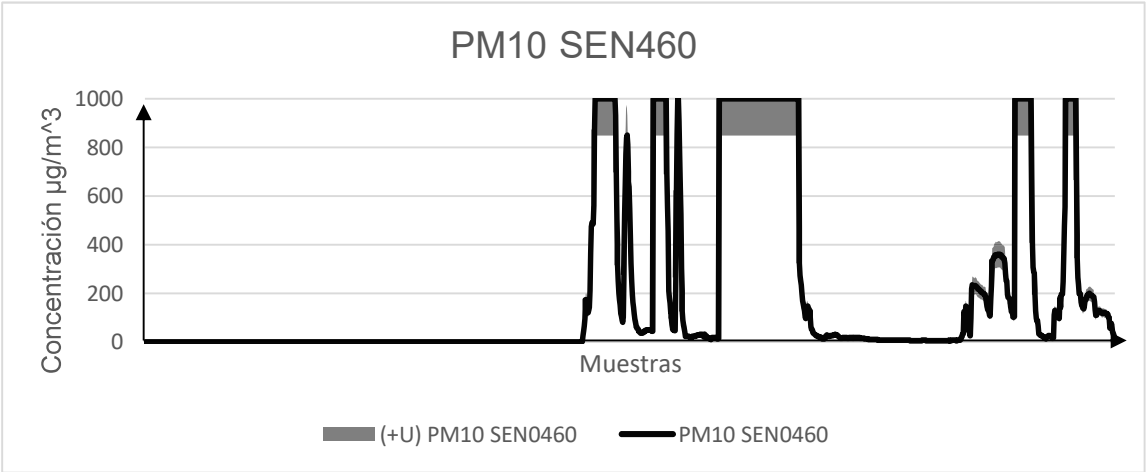




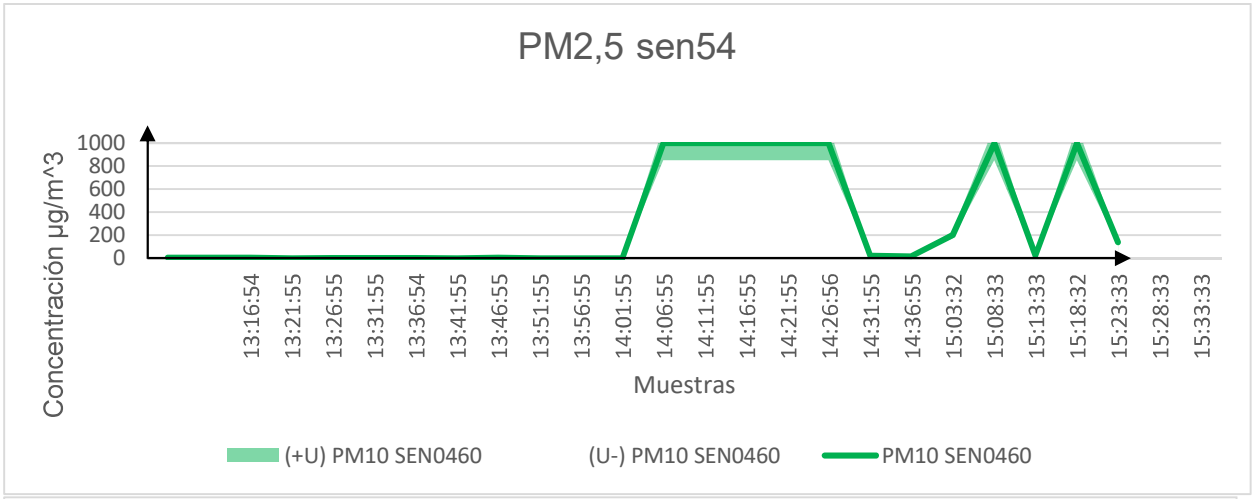

PM2,5 SDS011
Concentración µg/m^3
1000
800
600
400
200
0
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

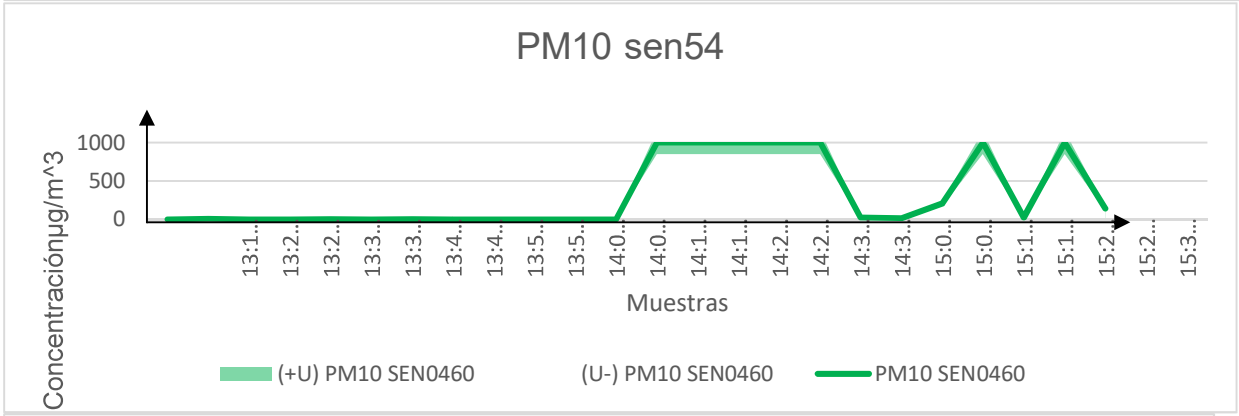

PM10 SDS011
Concentración µg/m^3
1000
800
600
400
200
0
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

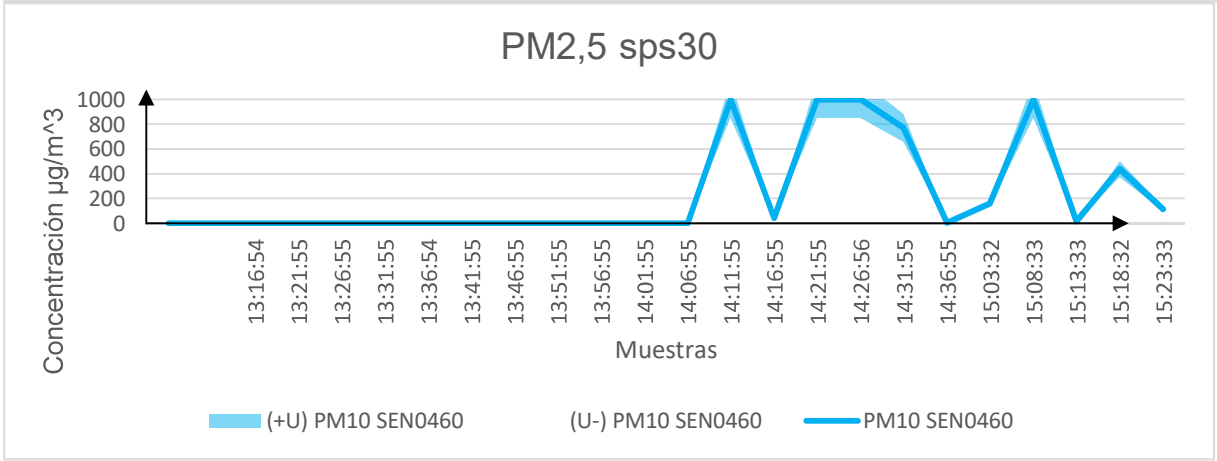

PM2,5 SEN460
Concentración µg/m^3
1000
800
600
400
200
0
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

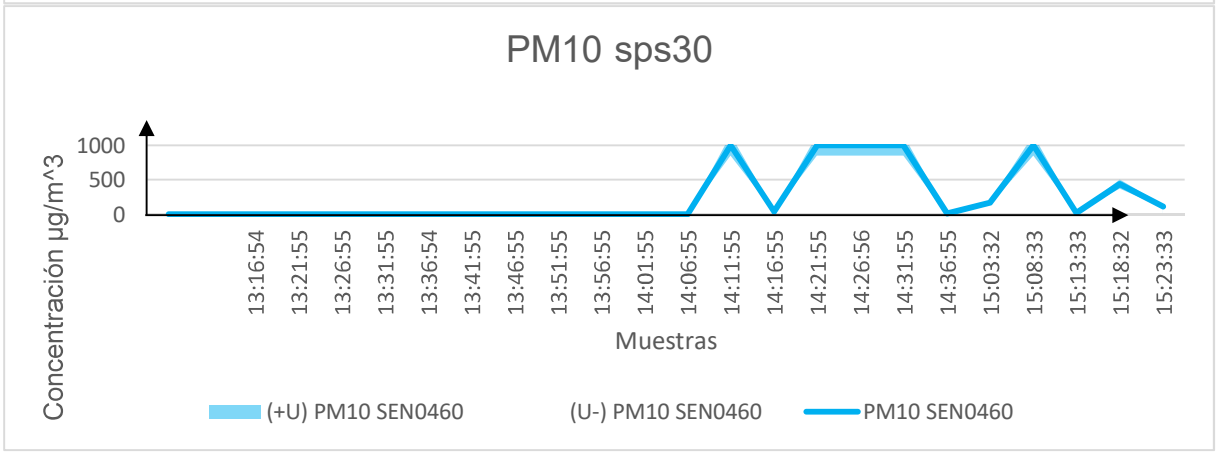

PM10 SEN460
Concentración µg/m^3
1000
800
600
400
200
0
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

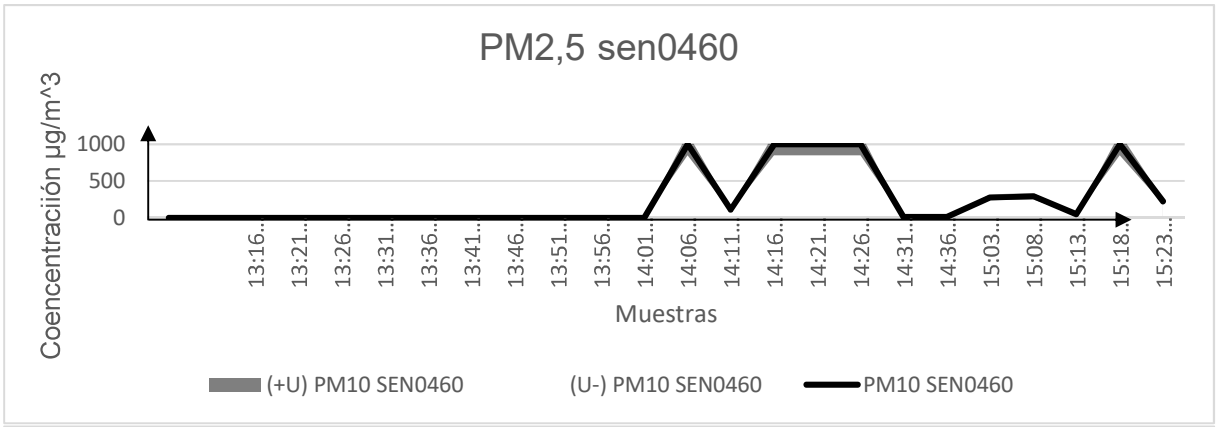
Para un muestreo de 5 minutos entre mediciones:

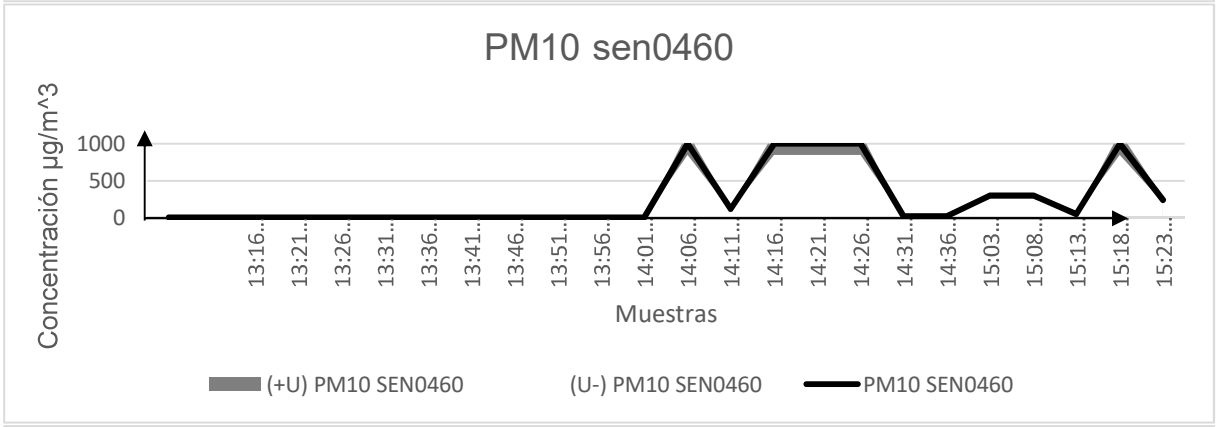


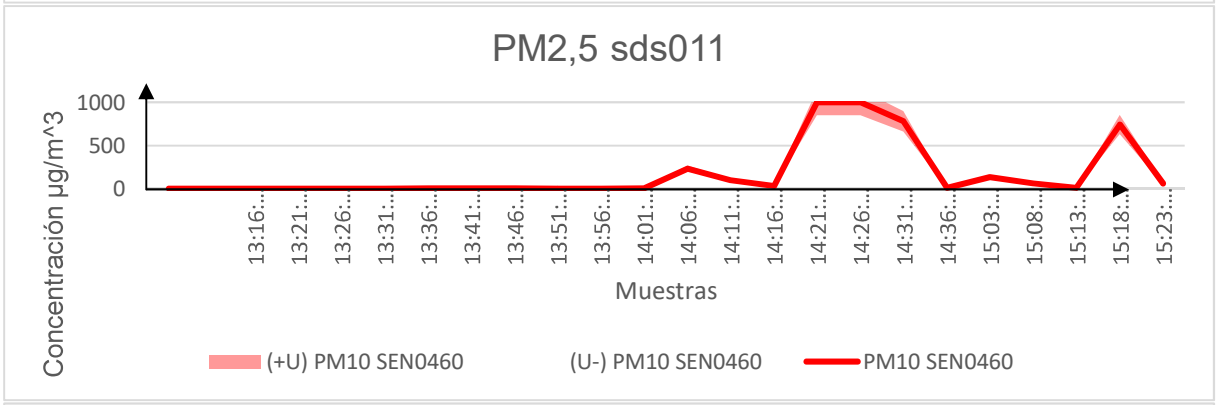


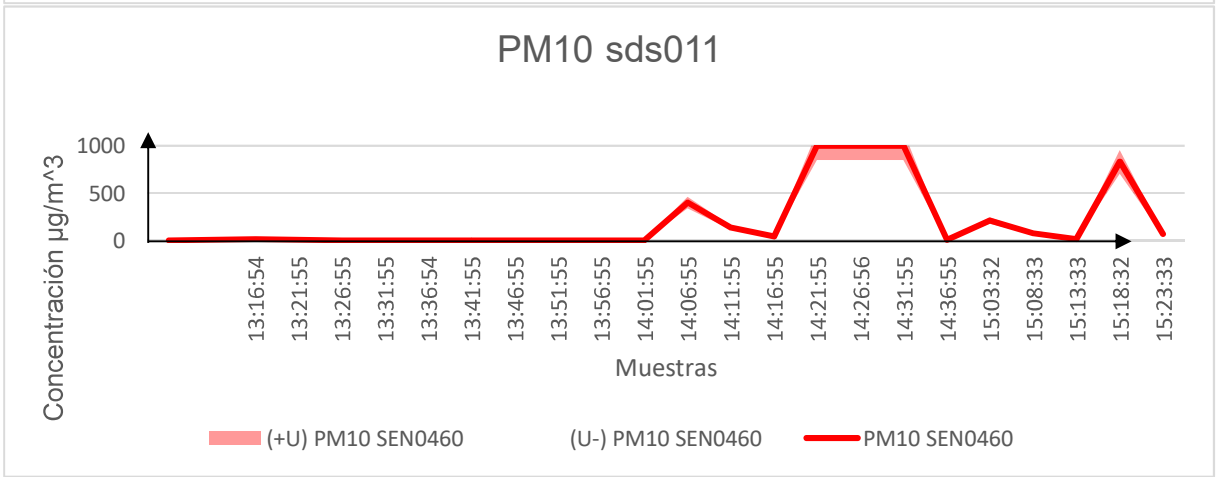


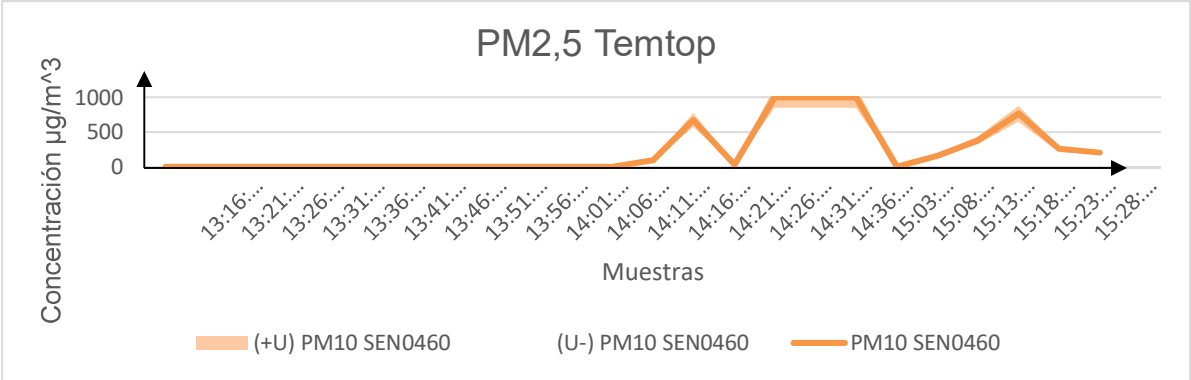


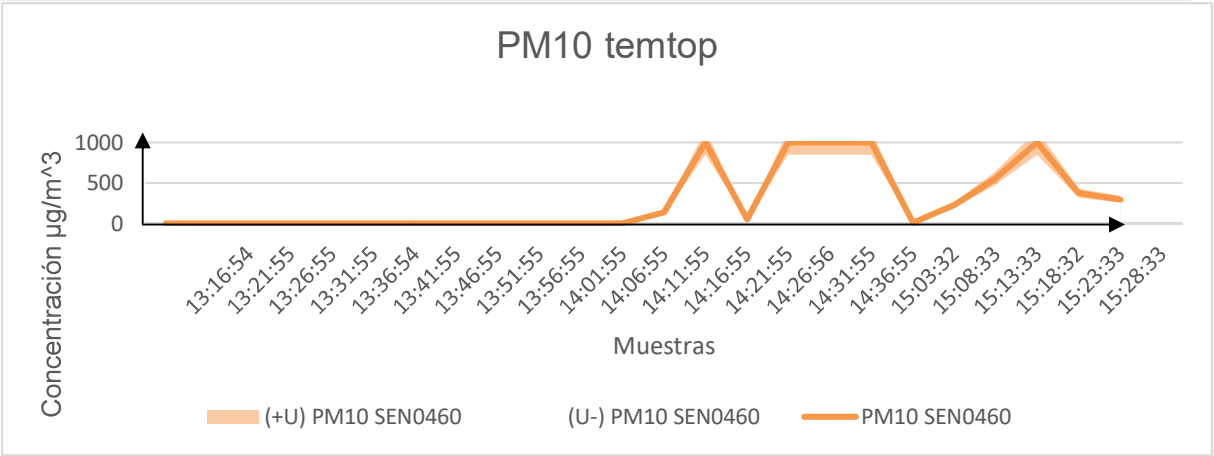

PM2,5 sen0460
Coencentraciión µg/m^3
1000
500
0
13:16:...
13:21:...
13:26:...
13:31:...
13:36:...
13:41:...
13:46:...
13:51:...
13:56:...
14:01:...
14:06:...
14:11:...
14:16:...
14:21:...
14:26:...
14:31:...
14:36:...
15:03:...
15:08:...
15:13:...
15:18:...
15:23:...
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

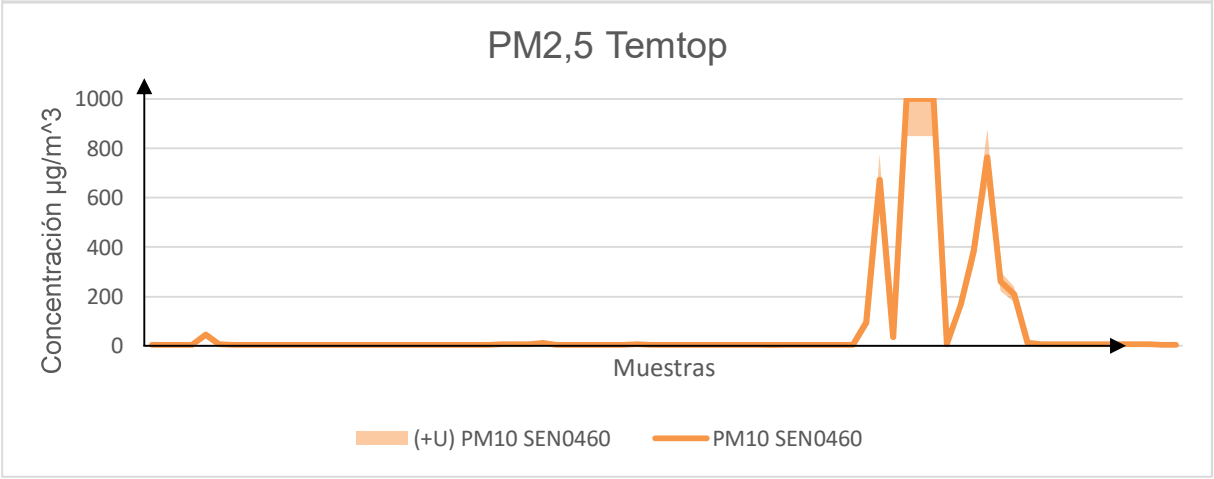

PM10 sen0460
Concentración µg/m^3
1000
500
0
13:16:...
13:21:...
13:26:...
13:31:...
13:36:...
13:41:...
13:46:...
13:51:...
13:56:...
14:01:...
14:06:...
14:11:...
14:16:...
14:21:...
14:26:...
14:31:...
14:36:...
15:03:...
15:08:...
15:13:...
15:18:...
15:23:...
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

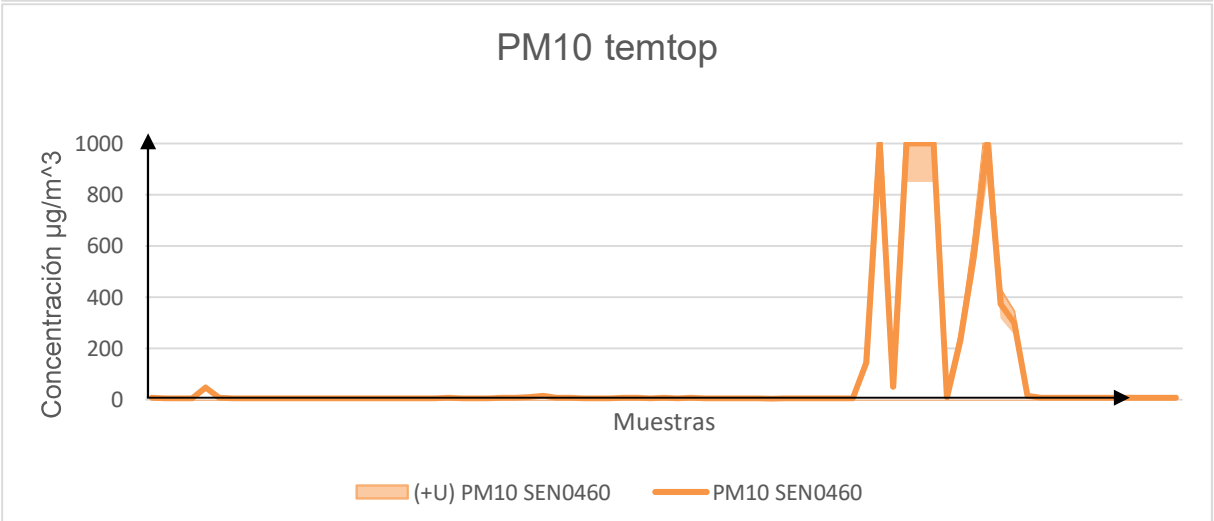

PM2,5 sds011
Concentración µg/m^3
1000
500
0
13:16:...
13:21:...
13:26:...
13:31:...
13:36:...
13:41:...
13:46:...
13:51:...
13:56:...
14:01:...
14:06:...
14:11:...
14:16:...
14:21:...
14:26:...
14:31:...
14:36:...
15:03:...
15:08:...
15:13:...
15:18:...
15:23:...
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460


PM10 sds011
Concentración µg/m^3
1000
500
0
13:16:54
13:21:55
13:26:55
13:31:55
13:36:54
13:41:55
13:46:55
13:51:55
13:56:55
14:01:55
14:06:55
14:11:55
14:16:55
14:21:55
14:26:56
14:31:55
14:36:55
15:03:32
15:08:33
15:13:33
15:18:32
15:23:33
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460


PM2,5 Temtop
Concentración µg/m^3
1000
500
0
13:16:...
13:21:...
13:26:...
13:31:...
13:36:...
13:41:...
13:46:...
13:51:...
13:56:...
14:01:...
14:06:...
14:11:...
14:16:...
14:21:...
14:26:...
14:31:...
14:36:...
15:03:...
15:08:...
15:13:...
15:18:...
15:23:...
15:28:...
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460


PM10 temtop
Concentración µg/m^3
1000
500
0
13:16:54
13:21:55
13:26:55
13:31:55
13:36:54
13:41:55
13:46:55
13:51:55
13:56:55
14:01:55
14:06:55
14:11:55
14:16:55
14:21:55
14:26:56
14:31:55
14:36:55
15:03:32
15:08:33
15:13:33
15:18:32
15:23:33
15:28:33
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
(U-) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460


PM2,5 Temtop
Concentración µg/m^3
1000
800
600
400
200
0
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460


PM10 temtop
Concentración µg/m^3
1000
800
600
400
200
0
Muestras
(+U) PM10 SEN0460
PM10 SEN0460

ANEXO E: Código de los Sensores

El siguiente código es constante para todos los sensores, teniendo únicamente diferencia en las librerías y funciones propias de los sensores.

El caso del DTH22 es peculiar, en vez de usar las variables pm, se toman las de temperatura y humedad. Por tanto, estas serán las pasadas como parámetro.

```
#include <Wire.h>          // Incluimos la librería para comunicación I2C
#include <SD.h>            // Incluimos la librería para la tarjeta microSD
#include <SPI.h>           // Incluimos la librería para la comunicación SPI
#include <Arduino.h>       // Incluimos la librería Arduino específica

// Creamos un objeto para la tarjeta microSD
File file_5s;
File file_30s;
File file_1m;
int chipSelect = 4;  // Pin digital al que está conectada la tarjeta microSD

// Variables para el control del tiempo de muestreo
unsigned long previousSampleTime_5s = 0;
unsigned long previousSampleTime_30s = 0;
unsigned long previousSampleTime_1m = 0;

// Según el tiempo deseado de muestreo se cambian los valores
unsigned long sampleInterval5s = 5000;     // 5 segundos
unsigned long sampleInterval30s = 60000;   // 30 segundos
unsigned long sampleInterval1min = 300000;  // 1 minuto (lo usaré)
//unsigned long sampleInterval5min = 300000;  // 5 minuto (lo usaré)
//unsigned long sampleInterval1hour = 360000;  // 1 hora (lo usaré)

void setup() {
  Serial.begin(9600);  // Iniciamos la comunicación serial
  inicio();
}

void loop() {
  ejecutarSensor();
}
```

```
//**************FUNCIONES AUXILIARES************************
//<<<<<<<<<<<<<<FUNCIONES SD>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
void inicioSD() {
  pinMode(chipSelect, OUTPUT);      // Configuramos el pin digital de la tarjeta microSD como salida
  if (!SD.begin(chipSelect)){// Verificamos si la tarjeta microSD disponible
    return;                         // Salimos del programa
  }
}
void abrirArchivo() {
  // Abrir archivos de la tarjeta SD
  file_5s = SD.open("b_5sp.txt", FILE_WRITE);
  file_30s =SD.open("b_1mp.txt", FILE_WRITE);
  file_1m = SD.open("b_5mp.txt", FILE_WRITE);
  // Comprobar si se pudieron abrir los archivos
  if (!file_5s || !file_30s || !file_1m) {
    Serial.println("Error al abrir los archivos en la tarjeta SD.");
    return;
  }
}
void guardarValorSD(unsigned long currentTime, float pm2d5, float pm10) {
  // Verificar si se debe tomar una muestra y escribir en el archivo
  if (currentTime - previousSampleTime_5s >= sampleInterval5s) {  // Muestreo cada 5 segundos
    Serial.print("Sen0460 Tiempo muestreo 5 segs: ");
    pantallaPrint_pm2d5_pm10(currentTime, pm2d5, pm10);
    escribirSD(file_5s, pm2d5, pm10);
// Actualizar la referencia de tiempo para el siguiente intervalo de muestreo
    previousSampleTime_5s = currentTime;
  }
  if (currentTime - previousSampleTime_30s >= sampleInterval30s) {  // Muestreo cada 30 segundos
    Serial.print("Tiempo muestreo 1 minuto: ");
    pantallaPrint_pm2d5_pm10(currentTime, pm2d5, pm10);
    escribirSD(file_30s, pm2d5, pm10);
```

```
    previousSampleTime_30s = currentTime;
  }
  if (currentTime - previousSampleTime_1m >= sampleInterval1min) {  // Muestreo
cada 1 minuto
    Serial.print("Tiempo muestreo 5 minutos: ");
    pantallaPrint_pm2d5_pm10(currentTime, pm2d5, pm10);
    escribirSD(file_1m, pm2d5, pm10);
    previousSampleTime_1m = currentTime;
  }
  file_5s.close();
  file_30s.close();
  file_1m.close();
}
void escribirSD(File archivoEscribir, float pm2d5, float pm10) {
  //Escribir en la SD
  archivoEscribir.print(pm2d5);
  archivoEscribir.print(",");
  archivoEscribir.print(pm10);
  archivoEscribir.println();
}
//^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^


//<<<<<<<<<<<<FUNCIONES                    PRINT                    POR
PANTALLA>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
void printInicial() {
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
}
void pantallaPrint_pm2d5_pm10(unsigned long currentTime, float pm2d5, float pm10)
{
  Serial.print(currentTime);
  Serial.print(" s - PM_2,5: ");     // Escribimos en el archivo
  Serial.print(pm2d5);              // Escribimos en el archivo
  Serial.print(" mg/m3 - PM_10: ");  // Escribimos en el archivo
```

```
  Serial.print(pm10);             // Escribimos en el archivo
  Serial.println(" mg/m3");       // Escribimos en el archivo
  Serial.println();
}
//^^^
```

```
DFRobot SEN0460
#include "DFRobot_AirQualitySensor.h"
#define I2C_ADDRESS    0x19
  DFRobot_AirQualitySensor particle(&Wire ,I2C_ADDRESS);
//<<<<<<<<<<<<FUNCIONES SENSOR>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
void inicioSensor() {
  Serial.begin(115200);
  //Sensor init, initialize I2C, determined by the communication method currently used
  while(!particle.begin()){
    Serial.println("NO Deivces !");
    delay(1000);
  }
  Serial.println("sensor begin success!");
  delay(1000);
  datosSensor();

}
void datosSensor() {
    //Get sensor version number
  uint8_t version = particle.gainVersion();
  Serial.print("version is : ");
  Serial.println(version);
  delay(1000);
}
float iniciarMedidas() {
   /**
   *@brief Get the number of 0.3um PM in 0.1L of air
   *@param PARTICLENUM_0_3_UM_EVERY0_1L_AIR
   *@n     PARTICLENUM_0_5_UM_EVERY0_1L_AIR
   *@n     PARTICLENUM_1_0_UM_EVERY0_1L_AIR
   *@n     PARTICLENUM_2_5_UM_EVERY0_1L_AIR
   *@n     PARTICLENUM_5_0_UM_EVERY0_1L_AIR
   *@n     PARTICLENUM_10_UM_EVERY0_1L_AIR
   */
```

```
                float PM2_5Value = particle.gainParticleConcentration_ugm3(PARTICLE_PM2_5_STANDARD);
                float PM10Value = particle.gainParticleConcentration_ugm3(PARTICLE_PM10_STANDARD);
  unsigned long currentTime = millis();
  escribirValores(currentTime, PM2_5Value, PM10Value);
  delay(1000);
}

//^^^
```

Sensirion SEN54

```
//Libreria propia del sensor
#include <SensirionI2CSen5x.h>
//En caso de ser I2C
// The used commands use up to 48 bytes. On some Arduino's the default buffer
// space is not large enough
#define MAXBUF_REQUIREMENT 48
#if (defined(I2C_BUFFER_LENGTH) &&                \
    (I2C_BUFFER_LENGTH >= MAXBUF_REQUIREMENT)) || \
                (defined(BUFFER_LENGTH)        &&        BUFFER_LENGTH        >=
MAXBUF_REQUIREMENT)
#define USE_PRODUCT_INFO
#endif
//SENSIRION SEN54
SensirionI2CSen5x sen5x;
//<<<<<<<<<<<<<<FUNCIONES
SENSOR>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
void inicioSensor() {
  //Sensor init, initialize I2C, determined by the communication method currently used
  while (!Serial) {
    Serial.println("No devices!");
    delay(1000);
  }
    Wire.begin();
  sen5x.begin(Wire);
  sen5x.deviceReset();
   datosSensor();
    float tempOffset = 0.0;
    sen5x.setTemperatureOffsetSimple(tempOffset);
    // Start Measurement
    sen5x.startMeasurement();
}
void datosSensor() {
    unsigned char productName32;
    uint8_t productNameSize = 32;
```

```
    sen5x.getProductName(productName, productNameSize);
    uint8_t firmwareMajor;
    uint8_t firmwareMinor;
    bool firmwareDebug;
    uint8_t hardwareMajor;
    uint8_t hardwareMinor;
    uint8_t protocolMajor;
    uint8_t protocolMinor;
    sen5x.getVersion(firmwareMajor, firmwareMinor, firmwareDebug,
                     hardwareMajor, hardwareMinor, protocolMajor,
                     protocolMinor);
}

float iniciarMedidas() {
    // Read Measurement
    float massConcentrationPm1p0;
    float massConcentrationPm2p5;
    float massConcentrationPm4p0;
    float massConcentrationPm10p0;
    float ambientHumidity;
    float ambientTemperature;
    float vocIndex;
    float noxIndex;
    delay(1000);
    sen5x.readMeasuredValues(
                              massConcentrationPm1p0,        massConcentrationPm2p5,
massConcentrationPm4p0,
        massConcentrationPm10p0, ambientHumidity, ambientTemperature, vocIndex,
        noxIndex);
      unsigned long currentTime = millis();
                              escribirValores(currentTime,        massConcentrationPm2p5,
massConcentrationPm10p0);
}
//^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

Sensirion SPS30

```
//Librería propia del sensor
#include <sps30.h>

//En caso de ser I2C
// The used commands use up to 48 bytes. On some Arduino's the default buffer
// space is not large enough
#define MAXBUF_REQUIREMENT 48
#if (defined(I2C_BUFFER_LENGTH) &&                \
    (I2C_BUFFER_LENGTH >= MAXBUF_REQUIREMENT)) || \
                (defined(BUFFER_LENGTH)        &&        BUFFER_LENGTH        >=
MAXBUF_REQUIREMENT)
#define USE_PRODUCT_INFO
#endif
//<<<<<<<<<FUNCIONES SENSOR>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
void inicioSensor() {
  sensirion_i2c_init();
 sps30_probe();
 sps30_start_measurement();
}
float iniciarMedidas() {
  struct sps30_measurement m;
  char serialSPS30_MAX_SERIAL_LEN;
  uint16_t data_ready;
  int16_t ret;
  do {
    ret = sps30_read_data_ready(&data_ready);
    if (ret < 0) {
      Serial.print("error reading data-ready flag: ");
      Serial.println(ret);
    } else if (!data_ready)
      Serial.print("data not ready, no new measurement available\n");
    else
```

```
      break;
    delay(100); /* retry in 100ms */
  } while (1);

  ret = sps30_read_measurement(&m);
  if (ret < 0) {
    Serial.print("error reading measurement\n");
  } else {
    unsigned long currentTime = millis();
    escribirValores(currentTime, m.mc_2p5, m.mc_10p0);
  }
}
//^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

Nova SDS011

```
#include <Wire.h>              // Incluimos la librería para comunicación I2C
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  // Incluimos la librería para la pantalla LCD I2C
#include <SD.h>                // Incluimos la librería para la tarjeta microSD
#include <SPI.h>               // Incluimos la librería para la comunicación SPI
#include <Arduino.h>
#include <SDS011.h>

/* SDS011 Dust Sensor */
SDS011 sds;
float p10, p25;


//<<<<<<<<<<<<FUNCIONES SENSOR>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>

void inicioSensor() {
  sds.begin(2, 3); //RX, TX
  Serial.begin(9600);
}
void datosSensor() {
}

float iniciarMedidas() {
// Wake up SDS011
    sds.read(&p25, &p10);

  unsigned long currentTime = millis();
  escribirValores(currentTime, p25, p10);
}
//^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^
```

DHT22 AM2302

A tener en cuenta que se pasa como variable la temperatura y humedad en vez de la concentración PM.

```
#include <DHT.h>              // Incluimos la librería para el sensor DHT22
#define DHTPIN 2      // Pin digital al que está conectado el sensor DHT22
#define DHTTYPE DHT22  // Tipo de sensor DHT

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);  // Creamos un objeto para el sensor DHT22
//<<<<<<<<<<<<<<<<<<FUNCIONES
SENSOR>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
void inicioSensor() {
  dht.begin();  // Iniciamos el sensor DHT22
}
float iniciarMedidas() {
  float temperature = dht.readTemperature();  // Leemos la temperatura
  float humidity = dht.readHumidity();        // Leemos la humedad

  // Obtener la marca de tiempo actual
  unsigned long currentTime = millis();
  escribirValores(currentTime, temperature, humidity);
}
//^^^
```

ANEXO F: Metodología

Basado en la metodología "Scrum", se sigue el siguiente proceso en colaboración con Juan Antonio Rodríguez Rama, tutor externo y miembro del equipo TELLUS UPM:

1-Product Backlog: Se crea una lista de tareas y funcionalidades que se incluyen en el proyecto. Para esta fase, se definen los objetivos del proyecto y las necesidades del cliente (Fundación CEPSA).

2-Sprint Planning: Se definen los objetivos específicos para cada sprint y se organizan las tareas necesarias para su cumplimiento.

3-Sprints: Se llevan a cabo las tareas planificadas durante cada sprint. La duración de cada sprint varía entre 1 y 3 semanas, en función del tamaño y complejidad del plan a realizar.

4-Weekly Scrum: Se llevan a cabo reuniones semanales con el equipo con el fin de revisar el progreso, compartir problemas y establecer planes para la semana siguiente.

5-Sprint Review: Al concluir cada sprint, se evalúa el progreso y se determina si se han cumplido los objetivos. Se identifican áreas de mejora y se ajusta el Product Backlog en consecuencia.

6-Sprint Retrospective: Al finalizar cada sprint, se realiza una reunión de equipo para reflexionar sobre el proceso de trabajo y evaluar posibles mejoras para el siguiente sprint. El equipo está compuesto por un total de 5 personas.

7-Repetir: Se repiten los pasos del 2 al 6 hasta la conclusión del proyecto.