



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“Implementación de un Nodo para Monitoreo de la Contaminación del Aire y
Diseño de la Red de Sensores en Ejes viales de Cuenca, Ecuador”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Autor:

FRANCISCO XAVIER VÉLEZ MACANCELA

Director:

MSC. JAIME SEBASTIAN BURBANO VILLAVICENCIO

CUENCA, ECUADOR

2024

Implementación de un Nodo para Monitoreo de la Contaminación del Aire y Diseño de la Red de Sensores en Ejes viales de Cuenca, Ecuador

El incremento de la actividad antropogénica conlleva un aumento en la contaminación ambiental generada por material particulado, específicamente 2.5 (PM2.5) y 10 (PM10) micras. En este estudio se diseña e implementa un nodo para el monitoreo de dichos contaminantes, que reporta la información recolectada en tiempo real a través de la red móvil de telecomunicaciones y una plataforma SaaS (Software as a Service) de uso abierto. En principio, la información obtenida del prototipo se contrasta con una estación certificada. Como resultado, se determinaron factores de corrección mediante el cálculo estadístico de regresión lineal para mejorar el rendimiento del sensor empleado, en donde, en el dataset de validación se obtuvo un valor de coeficiente determinístico (r^2) de 0.6885 para PM2.5 y de 0.5946 para PM10. Finalmente, el prototipo fue implementado en un escenario real para validar su operatividad, entregando datos periódicos con una tasa del 96% de paquetes enviados.

Palabras clave: Contaminación, material particulado, monitoreo, sensores inalámbricos.



Firmado electrónicamente por:
JAIME SEBASTIAN
BURBANO
VILLAVICENCIO

Jaime Sebastián Burbano Villavicencio

Director de Tesis



Firmado electrónicamente por:
DANIEL ESTEBAN
ITURRALDE PIEDRA

Daniel Esteban Iturralde Piedra

Director de Escuela



Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO XAVIER
VELEZ MACANCELA

Francisco Xavier Vélez Macancela

Autor

Implementation of a Node for Air Pollution Monitoring and Design of the Sensor Network in Road Axes of Cuenca, Ecuador

The increase in anthropogenic activity generates environmental pollution related to the particulate matter, specifically 2.5 (PM2.5) and 10 (PM10) microns. In this study, a node is designed and implemented to monitor these pollutants. It reports the information collected in real time through the mobile telecommunications network and an open SaaS (Software as a Service) platform. In principle, the information obtained from the prototype is compared with a certified monitoring station. As a result, correction factors were determined through the statistical calculation of linear regression to improve the performance of the sensor used, where, in the validation data set, a deterministic coefficient value (r^2) of 0.6885 was obtained for PM2.5 and of 0.5946 for PM10. Finally, the prototype was implemented in a real scenario to validate its operation, delivering periodic data with a rate of 96% of packages sent.

Key words: Pollution, particulate matter, monitoring, wireless sensors.



Firmado electrónicamente por:
JAIME SEBASTIAN
BURBANO
VILLAVICENCIO

Ing Jaime Burbano Villavicencio

Thesis Director



Firmado electrónicamente por:
DANIEL ESTEBAN
ITURRALDE PIEDRA

Daniel Esteban Iturralde Piedra

School Director



Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO XAVIER
VELEZ MACANCELA

Francisco Xavier Vélez Macancela

Author

Implementación de un Nodo para Monitoreo de la Contaminación del Aire y Diseño de la Red de Sensores en Ejes viales de Cuenca, Ecuador

Francisco Xavier Vélez Macancela
xvelez@es.uazuay.edu.ec
Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería Electrónica
Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador

Resumen—El incremento de la actividad antropogénica conlleva un aumento en la contaminación ambiental generada por material particulado, específicamente 2.5 (PM2.5) y 10 (PM10) micras. En este estudio se diseña e implementa un nodo para el monitoreo de dichos contaminantes, que reporta la información recolectada en tiempo real a través de la red móvil de telecomunicaciones y una plataforma SaaS (Software as a Service) de uso abierto. En principio, la información obtenida del prototipo se contrasta con una estación certificada. Como resultado, se determinaron factores de corrección mediante el cálculo estadístico de regresión lineal para mejorar el rendimiento del sensor empleado, en donde, en el dataset de validación se obtuvo un valor de coeficiente determinístico (r^2) de 0.6885 para PM2.5 y de 0.5946 para PM10. Finalmente, el prototipo fue implementado en un escenario real para validar su operatividad, entregando datos periódicos con una tasa del 96 % de paquetes enviados.

Palabras clave: Contaminación, material particulado, monitoreo, sensores inalámbricos.

I. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Cuenca, el crecimiento poblacional ha desencadenado un incremento sustancial del parque automotor. Esto a su vez, ha generado una mayor contaminación ambiental, preocupando al gobierno local, a los investigadores y a la ciudadanía en general. Por dichos motivos, en los últimos años se han realizado múltiples esfuerzos conjuntos por generar información referente a la contaminación producida por material particulado en la zona urbana.

Actualmente, en el cantón se cuenta con aproximadamente 20 estaciones pasivas de monitoreo, que brindan información mensual de los índices de contaminación y tres estaciones automáticas que generan información en tiempo real. Esta red de monitoreo híbrida se utiliza para la medición de la calidad del aire en múltiples puntos del casco urbano. Sin embargo, al estar conformada mayoritariamente por estaciones pasivas, provee una pobre resolución temporal. Por otra parte, las estaciones, que si bien adquieren datos en tiempo real, ofrecen únicamente una medición generalizada a toda la ciudad. Es decir, no proveen datos referentes a la exposición directa de material particulado. Las estaciones poseen un radio de cobertura aproximado de 4 kilómetros y la captación de datos acorde con lo establecido para la medición de la calidad del aire se realiza sobre los 30m de altura. Por esta razón, podrían existir sectores de la urbe que experimenten una realidad diferente a la monitoreada. Este hecho es de especial importancia si se contempla la influencia del parque automotor, ya que, indudablemente cada sector

tendrá una diferente afluencia de vehículos a lo largo del día, provocando índices de contaminación distintos. Por este, entre otros motivos, existen dificultades crecientes para monitorear y analizar con precisión los ejes viales donde se concentraría el material particulado. La instalación de múltiples estaciones automáticas con características similares a las existentes a lo largo del casco urbano resulta inviable en un futuro cercano, principalmente debido a los altos costos de adquisición y mantenimiento que se requiere. Esto deriva en una resolución espacial y temporal de la información limitada. Por ello, los ciudadanos pueden estar expuestos a emisiones directas que no son reportadas por las estaciones automáticas. Esto se debe a que, únicamente una porción del material particulado se eleva a la altura a la que la estación automática realiza la medición. Finalmente, la naturaleza arquitectónica de la ciudad, especialmente en el centro histórico, forma callejones que dificultan una dispersión idónea del material particulado emitido por los vehículos.

La red híbrida de estaciones de monitoreo son administradas por la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca (EMOV EP), quienes, divulgan información referente a la calidad del aire en la ciudad. Un claro ejemplo de ello, se refleja en la plataforma de visualización de variables atmosféricas [1], que permite conocer la información ambiental de la ciudad de Cuenca. Sin embargo, en [2], se determinó la necesidad de un mayor alcance de cobertura, mediante procesamiento de imágenes satelitales. Aquí, se estimó la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron favorables, si se busca un monitoreo focalizado y en tiempo real.

Este trabajo propone la implementación de sensores inalámbricos de material particulado de bajo costo, con un nodo sensor pequeño de fácil montaje y traslado. Nuestro estudio contempla la comparación de los datos de PM2.5 y PM10 generados por el nodo prototipo, con la información recopilada de una estación automática certificada. Estos datos se contrastan y relacionan mediante métodos estadísticos, con el afán de mejorar el rendimiento del prototipo. Al ser un proyecto escalable, se realiza también un diseño de red de sensores en uno de los principales ejes viales de la ciudad, donde se hace énfasis en los parámetros necesarios para su implementación.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera: En la sección II se presenta una introducción a las redes

de monitoreo de calidad del aire y las variables de análisis que inciden dentro de las mismas. La sección III describe las características de los sensores activos para la detección de material particulado, fundamentado en un análisis del estado del arte, enfatizando en los sensores de dispersión láser. La sección IV, describe las pruebas ejecutadas de conectividad y detección de la contaminación producida por PM, según los datos obtenidos por el sensor de prueba. En la sección V se analizan los datos adquiridos por el prototipo y los datos mostrados por la estación 01 de la EMOV EP, mediante el método estadístico de regresión lineal simple. En la sección VI se realiza un análisis de la factibilidad de escalabilidad del prototipo de sensores de bajo costo en uno de los principales ejes viales del cantón, en donde, se consideran datos relevantes para la implementación y una cantidad de sensores estimada. En la sección VII, finalmente, se presentan las conclusiones del estudio realizado.

II. CALIDAD DEL AIRE Y REDES DE MONITOREO

La atmósfera terrestre está conformada por una envoltura gaseosa de 2000 km de espesor. En función de la distribución de temperatura, se divide en troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. En la troposfera se encuentra la mayoría de la masa de gases totales de la atmósfera [3]. En este contexto, la contaminación atmosférica se define como la adición de sustancias que alteran las propiedades físicas o químicas del aire, ya sea por causas antrópicas o naturales, provocando efectos negativos en la salud de los habitantes. Éstos están generalmente relacionados con problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y pulmonares [4] [3].

La Organización Mundial de la Salud (OMS), así como el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), destacan a la contaminación del aire como una amenaza ambiental para la salud humana, siendo un factor influyente en la mortalidad a nivel mundial, por lo que, buscan estrategias para mejorar la calidad ambiental. En la actualidad, el número de enfermedades producidas por el tabaquismo y las dietas poco saludables va a la par con las enfermedades atribuibles a la contaminación del aire [2] [5].

La normativa estadounidense Agencia Nacional para la Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), es un referente a nivel mundial para la regulación de la calidad del aire y medio ambiente con la finalidad de proteger la salud pública. Para el monitoreo de la calidad del aire y concentración de sustancias contaminantes exigen métodos tecnológicos de vanguardia que entreguen información precisa y confiable. El indicador establecido por esta normativa se conoce como Air Quality Index (AQI) y está representado desde 0 a 500, dividido en seis escalas con un color y una alerta para facilitar su interpretación [3]. En el Ecuador, el Ministerio del Ambiente (MAE) mediante el Plan Nacional de la Calidad del Aire (PNCA) publicado en 2013, se encarga de garantizar la calidad de vida y el derecho a un ambiente sano a los habitantes [2]. Cabe destacar que, la normativa legal ecuatoriana está basada en la normativa legal estadounidense.

La norma ecuatoriana “Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente” (TULSMA) en su apartado “Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas”, en el numeral 4.1.1.1 establece como contaminantes criterio del aire a los siguientes: óxidos de nitrógeno (NO, NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y las partículas producidas por la combustión de hidrocarburos. En el numeral 4.1.1.2 destaca como contaminantes no convencionales con efectos tóxicos o carcinogénicos al Benceno (C₆H₆), Cadmio (CD), Mercurio inorgánico (vapores) (HG) [6]. Según [7] y [8], entre las principales fuentes de contaminación naturales se encuentran los océanos debido a que, el mar tiene gases disueltos en equilibrio. Aquí se produce el aerosol marino con compuestos como por ejemplo: monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de nitrógeno (N₂O), cloruro de metilo (CLCH₃), entre otros. Así mismo, los volcanes cuando erupcionan emiten gases como sulfuro de hidrógeno (H₂S), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), cloruro de hidrógeno (HCL), ácido fluorhídrico (HF), partículas sólidas y cenizas, provocadas por la combustión, debido a las altas temperaturas. Los incendios forestales emiten grandes cantidades de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). Por otra parte, la contaminación antropogénica genera aproximadamente 800 mil toneladas al año de compuestos contaminantes, en donde se estima que el 80 % está vinculado al uso de los combustibles fósiles. Aquí se encuentran productos orgánicos oxidados, compuestos metálicos y partículas sólidas (material particulado) [9] [10].

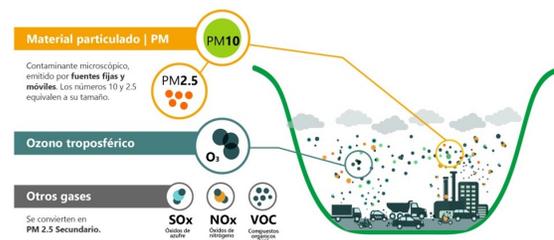


Figura 1. Partículas contaminantes, entre ellas material particulado [11].

El material particulado o material sedimentable, conocido por sus siglas en inglés PM (Particulate Matter), es uno de los contaminantes principales considerado dentro de los factores de incidencia de la calidad del aire, debido a que, se deposita con facilidad dentro de los organismos vivos. El PM es una mezcla compleja de partículas sólidas o líquidas, de varios tamaños y con distintos componentes físicos o químicos presentes en la atmósfera y su comportamiento está ligado a factores meteorológicos y topográficos [7] [8]. El PM suspendido en el aire contiene partículas de metales pesados, silicatos (silicio, calcio), sulfatos y hollín (PM aglomerado); producidos principalmente por los hidrocarburos derivados del petróleo. El PM se compone también por residuos de combustión de carbón, ceniza volcánica, desechos orgánicos, polen, materiales sintéticos o gotas de rocío de lluvias ácidas

[8] [10].

El PM se clasifica por su tamaño y se divide en partículas finas y gruesas. Las partículas menores a 10 micrómetros de diámetro tienen la posibilidad de penetrar y alojarse dentro de las vías respiratorias [3]. Estas partículas en específico se generan principalmente por la combustión. Por su parte, las partículas gruesas provienen en gran medida de fuentes naturales (ej. El polvo que se levanta por el viento) [7] [12]. En el estudio “Viabilidad temporal del PM10 en Bahía Blanca (Argentina) y su relación con variables climáticas” se determina que el PM10 se produce por factores naturales y factores antropogénicos como el flujo vehicular y las actividades portuarias. Además, se indica que es altamente recomendable implementar una metodología de monitoreo continuo de contaminación producida por PM, puesto que, el flujo vehicular en la ciudad cambia de manera significativa a lo largo de los días de la semana y las horas del día, generando diferentes niveles de contaminación que no pueden ser diseminados a través del uso de estaciones pasivas [13].

En América Latina y el Caribe se estima un aproximado de 100 millones de personas expuestas a niveles de contaminación superiores a 10ug/m³ y 20ug/m³ anuales de PM2.5 y PM10, respectivamente; siendo éstos límites establecidos por la Guía de Calidad del Aire creada por la Organización Mundial de la Salud (OMS), con respecto a la media anual, según se observa en la Figura 2 [9] [14].

Tabla I
NIVELES DE ÍNDICES RECOMENDADOS DE PM Y OBJETIVOS
INTERMEDIOS [5]

Contaminante	Tiempo	Objetivo Provisional	Nivel AQG
PM2.5 ug/m ³	Anual	35 / 25 / 15 / 10	5
PM2.5 ug/m ³	24Horas	75 / 50 / 37.5 / 25	15
PM10 ug/m ³	Anual	70 / 50 / 30 / 20	15
PM10 ug/m ³	24Horas	150 / 100 / 75 / 50	45

En Ecuador, la contaminación del aire se debe principalmente a la escasa planificación territorial e industrial en las ciudades, las tecnologías obsoletas o la baja calidad de los combustibles fósiles utilizados para maquinaria, generación de energía eléctrica y movilidad vehicular. En el año 2015, la Universidad San Francisco de Quito determinó que el 76 % de la contaminación del aire está dada por los automotores, el 15 % por fuentes naturales y el 9 % por industrias y generación eléctrica, produciendo 1211,2 toneladas al año de PM2.5 y 656,5 toneladas al año de PM10 [9] [15].

El control de los índices de contaminación del aire viene dado por métodos de muestreo. El muestreo pasivo recolecta mediante absorción y/o adsorción en un contenedor en forma de tubo o disco un determinado contaminante o sustancia química. Luego de un periodo de tiempo, definido entre una hora a un mes, se realiza la desorción de la muestra en el laboratorio, analizado cuantitativamente. Las estaciones pasivas no utilizan energía eléctrica pero su exactitud es baja. El muestreo activo, por otra parte, succiona el aire mediante un colector físico o químico, por ende, para su

funcionamiento necesita energía eléctrica. Estos dispositivos permiten visualizar valores máximos, mínimos y promedios. El muestreo automático recoge las muestras mediante cromatografía de gases y espectroscopia; con una alta resolución en sus mediciones. Permiten visualizar en tiempo real la información, pero su desventaja es el costo elevado de implementación, operación y mantenimiento. El muestreo por métodos de percepción remota (sensores remotos) transfiere una ráfaga de luz a una determinada longitud de onda a la atmósfera, obteniendo en tiempo real mediciones; éste método se conoce como espectroscopia. Son de alto costo de implementación, aunque su resolución es precisa y sus valores se muestran en tiempo real. El muestreo con bioindicadores usa especies de tipo vegetal. Su costo de implementación es la más económica, pero los problemas de estandarización de esta técnica impiden su desarrollo [3] [16].

Las técnicas de referencia se implementan en laboratorios que analizan la calidad del aire, según los límites legales. Para la medición de PM se utilizan fenómenos físico-químicos como fluorescencia-UV, quimioluminiscencia o espectrofotometría. Las técnicas no reguladas son incorporadas por los dispositivos electrónicos que almacenan o transportan la información [16]. Estos dispositivos pueden almacenar la información en una memoria extraíble o también, transmitir la información mediante una red alámbrica o inalámbrica. El monitoreo constante en tiempo real de un eje vial desde un punto fijo puede realizarse mediante una red alámbrica; sin embargo, una red inalámbrica facilita el desplazamiento del dispositivo de un punto a otro, manteniendo la conectividad y el monitoreo sin necesidad de cableado. Las tecnologías de comunicación inalámbrica difieren según la frecuencia de transmisión, la velocidad y el alcance. Una red de sensores inalámbricos (WSN) es un sistema confiable para la recopilación y análisis de datos ambientales, con una excepcional resolución temporal y espacial. Las redes WSN son capaces de transmitir, recibir y procesar información; además, son dispositivos autónomos de bajo costo, poco consumo energético, autoconfigurados y según las características de cada fabricante pueden acoplarse al ambiente y la humedad [17] [18]. Una red se compone de un número de sensores distribuidos en un sector o área determinada y son utilizados para varios casos de uso, entre ellos el monitoreo de incendios [19] o también, para el análisis de la contaminación en el aire y ruido [20].

Para proyectar el comportamiento de la concentración de PM en Cuenca, en el estudio presentado en [14], se relaciona la congestión vehicular en horas pico con las concentraciones de material particulado sedimentable (PM) mediante 30 puntos de monitoreo. Para la colección del PM, los autores colocan un contenedor abierto de 18cm de diámetro interno a una altura mayor a 1,2m sobre el nivel del suelo. Mientras que, para determinar el nivel de presión sonora (NPS) utilizan un sonómetro Testo 350 con un rango de 30 a 110 dB.

En [21], se propone la viabilidad de una red de sensores de bajo costo para el control de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, México; aquí se destaca la selección de varios sensores de bajo costo para PM10 y PM2,5 según

los límites máximos permisibles y la normativa vigente. Entre los resultados obtenidos, el estudio propone la implementación de 20 estaciones de monitoreo activas con un costo unitario aproximado de 500 dólares, que incluiría el costo por calibración.

En [4] se realizó una plataforma web de monitoreo para el análisis estadístico de variables atmosféricas en tiempo real, registradas por la estación automática de la EMOV EP, mediante la generación del Índice de Calidad del Aire (ICA). Esta plataforma también presenta reportes estadísticos filtrados por fecha y una gráfica lineal de variables atmosféricas diaria; facilitando la interpretación a la ciudadanía en general. Finalmente, en [22] plantean la implementación de sensores de bajo costo mediante Redes Inalámbricas de Sensores, para la visualización continua de temperatura, humedad, presión y ruido. Los sensores tuvieron que ser ajustados con un factor de corrección, en conformidad a las mediciones certificadas. La información recolectada se envía a través de GPRS a un servidor local para su posterior tratamiento. En cuanto a la medición de gases contaminantes, no se pudo realizar una corrección, ya que, el sensor de ozono presentaba una variación considerable de exactitud, dando valores alejados de la realidad. La comparación de los valores obtenidos por los sensores se realizó colocando los mismos junto a una estación de monitoreo automática.



Figura 2. Estación automática de calidad del aire y meteorología localizada en la estación MUN [1].

Para finalizar, un estudio realizado en Colombia y basado en el diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire (SVCA), concluyó que, las concentraciones son mayores a 2m de altura en referencia a los registros obtenidos a 10m; con una variación de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y con un pico de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10. Entre otros aspectos, también sugieren un análisis de la temperatura donde se ubicaría el sensor y su relación con el fenómeno de la inversión térmica en horas de la noche, en caso de presentarse un comportamiento opuesto a los resultados planteados. Los equipos utilizados en este estudio fueron Aeroqual Duste Sentry y una estación Met One [23].

III. SENSORES ACTIVOS PARA MATERIAL PARTICULADO

Los sensores de material particulado obtienen un tipo de señal en base a los contaminantes atmosféricos. Los sensores activos, mediante el transmisor emiten una longitud de onda de luz, electrones o una señal hacia un objetivo, brindando datos sobre el reflejo provocado. Están agrupados en sensores de postprocesados y sensores de tiempo real. Aquellos que almacenan partículas en contenedores para su posterior análisis de laboratorio se consideran postprocesados, en cambio, los que permiten la obtención de información sin necesidad de ningún procedimiento adicional son los sensores de tiempo real. En esta categoría están los sensores electroquímicos que proporcionan información mediante una reacción química entre el electrodo de un líquido dentro del sensor y los gases contaminantes. Su costo oscila entre los 50 a 200 dólares, su margen de sensibilidad a la humedad y temperatura varían según el electrolito [3] [24]. Los sensores de fotoionización miden la corriente eléctrica resultante en el ambiente, ionizando los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's). Su costo varía entre los 450 a 6000 dólares y dependen moderadamente de la humedad y la temperatura. Los sensores ópticos miden la cantidad de luz infrarroja absorbida. Su costo está entre los 150 a 2300 dólares, requieren una corrección por humedad y temperatura [24].

Los sensores de bajo costo para el monitoreo de partículas, permiten complementar las redes de monitoreo actuales. El principio de funcionamiento está basado en dispersión láser, realizando un conteo de partículas; se los conoce también como contadores ópticos. Su costo va desde 40 a 100 dólares, siendo un valor accesible a diferencia de los sensores detallados con anterioridad. Las redes de sensores inalámbricos para monitoreo del aire que están basados en este tipo de sensores, incluyen un microcontrolador y pueden medir las variables de su entorno y transmitir la información mediante enlaces inalámbricos hacia un nodo central (Gateway). Un nodo contiene una unidad de procesamiento, detección, alimentación y un transceiver [25] [17]. Para el análisis de tecnologías inalámbricas es importante conocer el alcance, la velocidad de transferencia y el porcentaje de datos transmitidos y recibidos [20].

Entre los estudios destacados a nivel internacional "Citizen science with common PM2.5 sensors Nova SDS011 and Sensirion SPS30", [26] destaca que el sensor Nova SDS011 se ha implementado en kits de sensores estacionarios a lo largo de varios años para reportes de PM2.5 y PM10, debido a su facilidad de interconexión y costo accesible, aunque requieren una calibración sustancial. En cambio, el sensor Sensirion SPS30 se ha incorporado recientemente en kits de sensores móviles y estacionarios, aunque no brinda datos reales de PM10 y necesita varias calibraciones para un adecuado funcionamiento. El proyecto móvil en la bicicleta Sniffer contenía un SPS30, un GPS y un chip de comunicación NB-IoT; transmitiendo datos promedio cada 10 segundos. El estudio menciona que, los contadores ópticos de bajo costo son sensibles a la humedad relativa para mediciones de PM2.5 y

PM10; por lo que es necesario varios sensores recopilando datos para obtener una información confiable. El Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos (RIVM), desarrolló un portal con un mapa de ubicación de los sensores que muestra al público los datos oficiales. Los datos de cada sensor se visualizan al seleccionar uno de ellos. En esta red los sensores son calibrados automáticamente. Este proyecto es ejecutado en los Países Bajos, en la provincia de Utrech y se estima un total de 1500 kits de sensores PM2.5 - PM10. Un ejemplo de los kits de bajo costo implementados en el estudio se puede observar en la Figura 4.

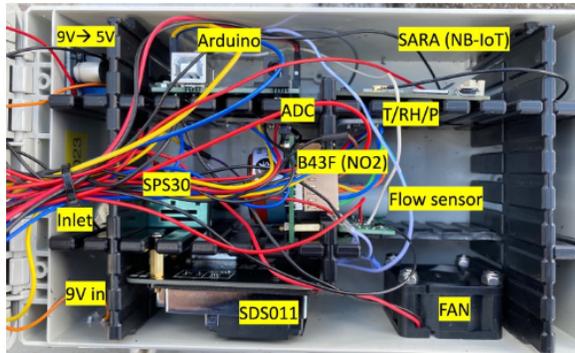


Figura 3. Kit de sensores desarrollado en Países Bajos [26].

En [3], se propone la aplicabilidad del uso de sensores de bajo costo como alternativa para la medición de la calidad del aire caso PM2.5, aquí se consideraron los principios técnicos y de operación de equipos automáticos aprobados por la EPA (2020). Posteriormente, se probaron varios equipos automáticos. Aquí destacó el Teledyne T-640 con sobresaliente medición de PM2.5, su información se describe en la Tabla II. Este sensor está compuesto por una bomba de vacío interna, una muestra de aerosol acondicionador y un controlador de flujo de muestra. Las alternativas consideradas para los sensores de dispersión láser fueron: Plantower PMS7003 y PMSA003, Honeywell HMPA115SO, Sensirion SPS30 y Panasonic SN-GCJA5. Los primeros resultados demostraron que todos los sensores podían medir PM2.5, sin embargo, ninguno mostró información de la sensibilidad de medición, concentración mínima detectable, debido al rango de medición y precisión limitado. El comportamiento en series de tiempo horaria y diaria, se asemeja al equipo de referencia, no obstante, sobreestimaron los valores de concentración de PM2.5. Los sensores Sensirion SPS30 y Honeywell HMPA115SO presentaron similitud en condiciones de variabilidad, en referencia al equipo Teledyne T-640. Finalmente, se determina que, el vapor de agua muy concentrado podría producir errores en los circuitos, dando resultados sesgados. La propuesta sugiere que los sensores de bajo costo sean un complemento para las redes de monitoreo de la calidad del aire locales, brindando valores indicativos para el control y monitoreo de la calidad del aire. El estudio se realizó en la ciudad de Bogotá.

En el estudio [27], se evaluó el desempeño de varios sensores Plantower PMS-7003 en la medición de PM10,

Tabla II
FICHA TÉCNICA DEL MONITOR DE PARTÍCULAS TELEDYNE T-640.

PRINCIPIO DE MEDICION	Espectroscopia de banda ancha combinado con dispersión de luz blanca
TIEMPO	10s - 48h
SENSIBILIDAD	<0.1ug/m3 (1h)
PRECISIÓN	± 0.5ug/m3 (1h)
RANGO MASA	0.1 - 10000 ug/m3
RESOLUCIÓN	0.1ug/m3
REGISTRO EPA	Vol. 77 p. 60985 5/10/2012



Figura 4. Equipo Teledyne T-640 [3].

PM2.5 Y PM1, tomando como referencia el equipo móvil Grimm-11C, complementados con una estación meteorológica DAVIS Instrument Incorporated modelo Vintage Pro 2, entre el invierno de 2019 y otoño del 2020. El equipo Grimm 11-C es un monitor portable que contiene 31 canales distintos para detección de partículas, con un rango de tamaño entre 0.253 a 32um, según se detalla en la Tabla III. El equipo Vantage Pro 2 mide cada 15 minutos variables de temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento. La medición simultánea, el monitoreo de la temperatura y la humedad, permitieron evaluar el desempeño según la variación de condiciones climáticas. Se concluyó que, los sensores de bajo costo dependen del tamaño de la partícula medida, en donde, obtuvo valores aceptables para PM1 y PM2.5, descartando las mediciones de PM10. El aumento de la humedad relativa no afectó el desempeño del sensor de bajo costo; cabe destacar que, los datos recolectados por el sensor se aproximan al equipo de referencia cuando existe mayor concentración de partículas PM2.5 y PM1. Finalmente, se determinó que la reducción de temperatura disminuyó el desempeño del sensor. El estudio se realizó en la ciudad de Santiago de Chile.

Tabla III
FICHA TÉCNICA DEL MONITOR MÓVIL DE PARTÍCULAS GRIMM 11-C.

PRINCIPIO DE MEDICION	Dispersión de haz de luz
TIEMPO	1s para 16 canales o 6s para 31 canales
SENSIBILIDAD	0.253 - 35.15 µm
PRECISIÓN	±97 % del rango total de medida
RANGO MASA	0.1 - 100000 ug/m3
RESOLUCIÓN	0.1ug/m3
REGISTRO ISO	ISO 21501-1

Entre los estudios nacionales y locales, [16] propone la

evaluación de la calidad del aire mediante el uso de sensores de bajo costo de material particulado, ubicados alrededor de dos estaciones de la red de monitoreo atmosférico del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). El monitoreo se realizó mediante sensores de PM2.5 Sensirion SPS30 ubicados alrededor de dos estaciones pertenecientes a La Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). Evaluando los datos obtenidos, la diferencia de información registrada por las estaciones de la red REMMAQ y los sensores de PM2.5 es notable, recomendando su implementación en ciudades con índices de contaminación moderados y con temperatura menor a 25°C. Además, sugieren que se implementen los sensores de bajo costo en un sitio exacto y cercano a la red de monitoreo municipal, así se evaluará la diferencia de los datos obtenidos, en referencia con la red municipal.

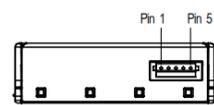
IV. IMPLEMENTACIÓN DEL NODO SENSOR

IV-A. Arquitectura del sistema

Al realizar el análisis bibliográfico, la recolección de datos del fabricante y la revisión de estudios relacionados con la contaminación del aire y la implementación de sensores de bajo costo, el tipo de sensor elegido para la realización del prototipo será de dispersión láser, debido al bajo costo de adquisición, reducido consumo de energía y su autonomía de tiempo de uso por horas. Respecto al mantenimiento en relación a cambios de la temperatura y humedad, no se detalla mayor información dentro de los estudios, a excepción del estudio realizado en Países Bajos, donde se determina la humedad relativa como un factor de funcionamiento de los sensores Sensirion SPS30 y Nova SDS011. Los estándares europeos y de la EPA no contemplan el uso de sensores de bajo costo dentro de la legislación, debido a la confiabilidad de las mediciones realizadas, por esto, las investigaciones realizadas están basadas en la comparación con instrumentos de referencia. Se detalla también que los sensores tienen pautas específicas emitidas por la EPA, basadas en su precisión y completitud de datos, definiendo áreas potenciales de aplicaciones, por ejemplo un estudio científico motivado a descubrir nueva información acerca de la contaminación del aire, mediante una red de sensores para material particulado atmosféricos en una ciudad [27].

Inicialmente, se recolectó las características e información referente a 11 sensores que brinden la medición de PM2.5; la literatura coincide con el uso del sensor Sensirion SPS30. Para la medición de PM10 el sensor Nova SDS011 presenta una buena respuesta. Sin embargo, la adquisición de éste sensor para la elaboración del prototipo no pudo concretarse, puesto que, su existencia en el mercado actual es escasa. En su lugar, se recomienda el sensor Honeywell HPM115S0-XXX, al obtener resultados aceptables dentro de su aplicación en varios estudios en Latinoamérica. Aquí, se descarta el sensor HPM115C0-00X de la misma marca, al no tener estudios referenciales que permitan conocer su funcionamiento. Se sugiere el sensor Plantower PMS7003 (7ma generación), evidenciando su presencia en varios estudios dentro de la región. Se descarta el sensor PMS5003 y la versión mini de la misma

marca, debido al rango de medición de partículas y el tiempo de autonomía del sensor. Los sensores de la marca Sharp y Panasonic, no son muy confiables porque presentan picos ligeros, esto disminuye su precisión al momento de una variación en la medición de partículas. Finalmente, los sensores de las marcas Amphenol y Omron están descontinuados y no se obtuvo alguna referencia de estudio para conocer su funcionamiento en campo. Dicha información se obtuvo de la hoja de datos de cada fabricante. Sin embargo, para la implementación del prototipo propuesto únicamente se usará el sensor Sensirion SPS30.



Pin	Name	Description	Comments
1	VDD	Supply voltage	5V ± 10%
2	RX	UART: Receiving pin for communication	TTL 5V and LVTTTL 3.3V compatible
	SDA	I ² C: Serial data input / output	
3	TX	UART: Transmitting pin for communication	TTL 5V and LVTTTL 3.3V compatible
	SCL	I ² C: Serial clock input	
4	SEL	Interface select	Leave floating to select UART Pull to GND to select I ² C
5	GND	Ground	Housing on GND

Figura 5. Conexión de pines del sensor Sensirion SPS30 [28].

Tabla IV
FICHA TÉCNICA DEL SENSOR SENSIRION SPS30.

PRINCIPIO DE MEDICION	Dispersión láser
TIEMPO	8s - 30s
SENSIBILIDAD	N/A
PRECISIÓN	±10 % del rango total de concentración PM2.5
RANGO MASA	0 - 1000 ug/m3
RESOLUCIÓN	0.1ug/m3
REGISTRO	N/A

Tabla V
FICHA TÉCNICA DEL SENSOR HONEYWELL HPMA115S0-XXX.

PRINCIPIO DE MEDICION	Dispersión láser
TIEMPO	6s
SENSIBILIDAD	N/A
PRECISIÓN	±15 % del rango total de concentración PM2.5
RANGO MASA	0 - 1000 ug/m3
RESOLUCIÓN	0.1ug/m3
REGISTRO	Estándar Internacional IEC61000

Tabla VI
FICHA TÉCNICA DEL SENSOR PLANTOWER PMS7003.

PRINCIPIO DE MEDICION	Dispersión láser
TIEMPO	±10s
SENSIBILIDAD	N/A
PRECISIÓN	±90 % del rango total de medida
RANGO MASA	0 - 1000 ug/m3
RESOLUCIÓN	1ug/m3
REGISTRO	N/A

El control del sensor se realiza a través de un microcontrolador ESP32, que es un circuito integrado que debe ser programado, según las necesidades requeridas [29] [30].

El módulo de transmisión de datos elegido es el SIM808 fabricado por Shanghai SIMCom Wireless Solutions, permite diseñar y configurar aplicaciones móviles. Contiene un motor GSM/GPRS de cuatro bandas que funciona en frecuencias de 850/900/1800/1900 MHz. Puede cumplir varios requisitos de aplicación como uso para M2M, teléfonos inteligentes, PDA y otros dispositivos móviles. Permite una comunicación vía interfaz serie UART (RX, TX) mediante comandos AT. La adaptación del SIM808 al módulo GSM/GPRS/GPS Arduino Shield (B) fue realizada por la marca Waveshare y contiene un conector para tarjeta SIM, MIC, altavoz y conector microUSB [31] [32]. El módulo GSM utiliza el estándar 2G, necesario para comunicaciones digitales. Una red GSM usa bandas de frecuencia de 900MHz y 1800MHz para Europa. En Ecuador, la banda de frecuencia usada es de 850Mhz y 1900Mhz. Su rendimiento es de 9.6Kbps, esto permite transmisión de voz y datos. En una red GSM la estación móvil consta de un módulo de identificación de abonado o tarjeta SIM, que identifica al usuario y terminal móvil. Cada tarjeta SIM posee un número de identificación único y secreto [33].

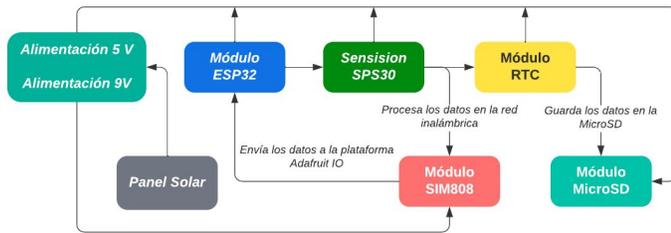


Figura 6. Diagrama de bloques del prototipo.

El reloj en tiempo real decimal (RTC) DS1307 funciona mediante codificación binaria (BCD) completo y de bajo consumo. Transmite los datos en serie a través de un bus bidireccional de dos hilos. Facilita la visualización de información en segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. También permite formato de 24 o 12 horas con indicador AM/PM. Detecta fallas de energía y cambia automáticamente al suministro de batería [34].

IV-B. Análisis de datos de PM transmitidos por el prototipo

Los datos obtenidos por el prototipo se visualizaron y grabaron en la plataforma Aadafruit IO, mediante comunicación MQTT y la redundancia de datos se obtuvo mediante la MicroSD. Se realizaron pruebas de la estabilidad de comunicación y transmisión de la información desde el martes 13 de febrero de 2024 hasta el sábado 17 de febrero de 2024. Los valores de PM_{2.5} y PM₁₀ fueron adquiridos en un intervalo de 5 minutos aproximadamente. Dentro de estos días, se ejecutaron dos pruebas de funcionamiento del sensor a exposiciones directas de humo.

El nodo prototipo se ubicó en las calles Anatolle Bamps y Hugo Vivar Flores a una cuadra y media del redondel de la 12 de Octubre y Autopista. Cabe destacar que, la calle Anatolle Bamps es de tierra, con un flujo vehicular intermitente. Una elevación considerable de polvo se produce cuando transitan

vehículos pesados. La distancia lineal entre la estación de monitoreo y la ubicación del nodo según google maps es de 3.75km aproximadamente, es decir, este sector se encuentra en el radio de cobertura de la estación Met One BAM-1020, cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla VII. El prototipo fue montado en el balcón de un domicilio a una altura estimada de 6m. Los datos adquiridos de PM_{2.5} y PM₁₀ se visualizan por separado en el historial de Feeds de la plataforma Aadafruit IO y también, son guardados en la micro SD del nodo prototipo.

Tabla VII
FICHA TÉCNICA DE LA ESTACIÓN MET ONE BAM-1020.

PRINCIPIO DE MEDICION	Atenuación de rayos beta
TIEMPO	Valores de concentración por hora, promedios del sensor de 1 a 60min
SENSIBILIDAD	0.1 mg/m ³
PRECISIÓN	±90 % del rango total de medida
RANGO MASA	0 - 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 mg/m ³
RESOLUCIÓN	0.1ug/m ³
REGISTRO EPA	Clase III FEM

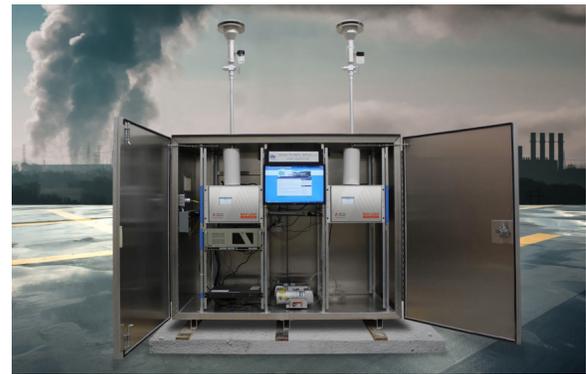


Figura 7. Estación Met One BAM-1020.

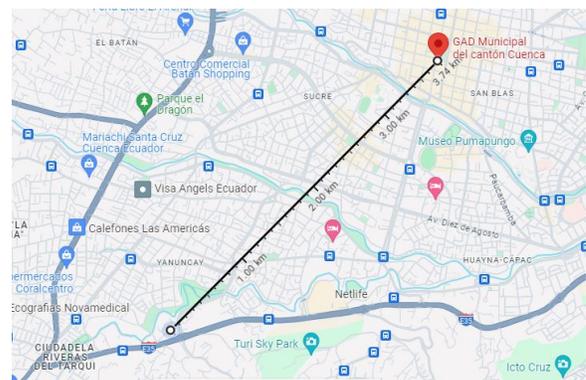


Figura 8. Ubicación del nodo prototipo y distancia estimada hacia la Estación 01 perteneciente a la EMOV EP.

Durante el periodo de prueba de transmisión de datos del prototipo, el viernes 16 de febrero se efectuaron pruebas de exposición del sensor SPS30 al humo del cigarrillo y al humo generado luego de apagar una vela. Antes de iniciar las pruebas, se registró un valor de PM_{2.5} de 5.25 µg/m³ y



Figura 9. Montaje del nodo prototipo en su primera etapa.

de PM10 de 5.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la primera prueba, el valor de PM2.5 alcanzó un máximo de 34.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia de exposición menor a 0.50m y un mínimo de 19.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia superior 0.50m. Por su parte, para PM10, se obtuvo un valor máximo de 34.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 19.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En esta prueba, se considera como un factor fundamental la distancia de exposición del sensor a los contaminantes ambiente. En la segunda prueba, se generó la exposición del humo producido al apagar una vela en intervalos de tiempos diferentes, pero manteniendo la distancia de exposición. El valor máximo de PM2.5 registrado fue de 21.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el valor mínimo fue de 20.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, para PM10 el valor máximo alcanzado fue de 21.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un valor mínimo de 20.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los datos presentados en las pruebas de comunicación fueron capturados previo a la calibración del sensor, por lo tanto, estos valores presentan cierta inestabilidad. En consecuencia, no son valores reales de PM. Por tal motivo, estas pruebas empíricas se realizaron para adquirir información mediante la conectividad inalámbrica del prototipo y también, para conocer si el comportamiento del sensor es coherente. Es decir, en condiciones donde se genera exposición a contaminantes, en este caso, al humo de la vela apagada y el cigarrillo. El martes 13 de febrero, durante las pruebas de transmisión se registraron valores elevados de PM2.5 y PM10 en la zona 1, según se muestran en las Figuras 11 y 12, respectivamente. Se presume que estos valores adquiridos tienen relación con la circulación vehicular en el sector estudiado. Al realizar estas pruebas, los valores de PM2.5 y PM10 tuvieron una ligera discrepancia entre sí, obteniendo un rango de diferencia en decimales. Además, se observa que el sensor funciona adecuadamente a una exposición directa de contaminante; también, se determina que el valor que obtiene el sensor es proporcional a la distancia existente entre el prototipo y el emisor de contaminación. El sensor no consigue reestablecerse con rapidez a una exposición constante de contaminantes, debido a que, es necesario que el ventilador disipe todo el contaminante ingresado abruptamente dentro de la cámara.

En general, los demás datos corresponden al monitoreo del prototipo expuesto a la interperie en las fechas anteriormente mencionadas. La oscilación de los valores está relacionado con las horas del día o de la noche; en el día, el registro

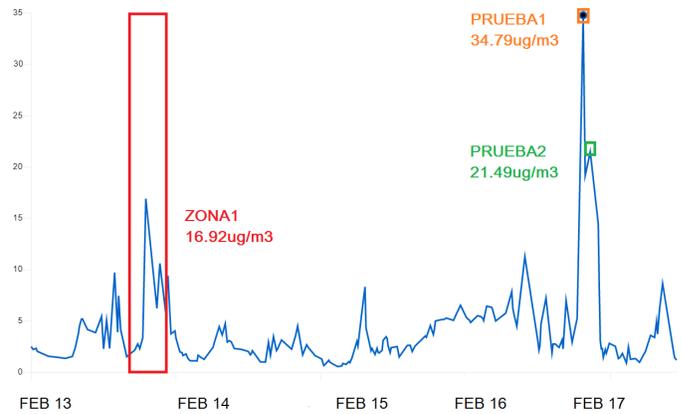


Figura 10. Valores de PM2.5 adquiridos por el prototipo durante el período de prueba de transmisión de datos.

Tabla VIII
VALORES PICOS EN LA ZONA 1 DE PM2.5 EN $\mu\text{G}/\text{M}^3$.

Hora	Máx.	Hora	Máx.	Hora	Máx.
7:00pm	16.92	9:20pm	10.61	10:40pm	9.41

Tabla IX
COMPARACIÓN DE VALORES DE PM2.5 AL EJECUTAR LAS PRUEBAS DE EXPOSICIÓN DE HUMO EN $\mu\text{G}/\text{M}^3$.

Inicial	Mín. P1	Máx. P1	Mín. P2	Máx. P2
5.25	19.16	34.79	20.52	21.49

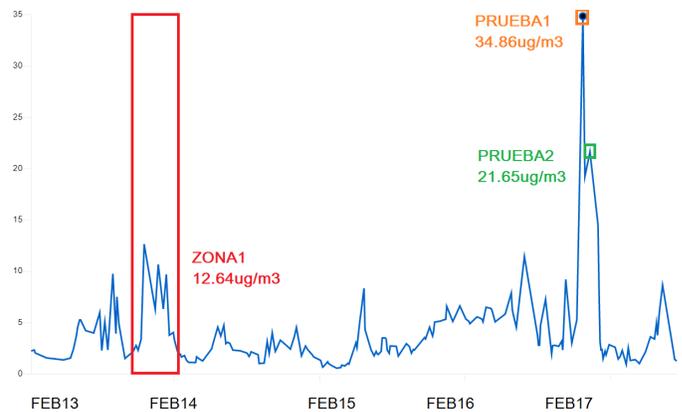


Figura 11. Valores de PM10 adquiridos por el prototipo durante el periodo de prueba de transmisión de datos.

Tabla X
VALORES PICOS EN LA ZONA 1 DE PM10 EN $\mu\text{G}/\text{M}^3$.

Hora	Máx.	Hora	Máx.	Hora	Máx.
7:00pm	12.64	9:20pm	10.66	10:40pm	10.68

de los datos presenta un incremento desde las 7:00am; en cambio en la noche, los datos tienden a la baja a partir de las 11:00pm. En el horario de 7:00am a 10:59pm se deduce que la

Tabla XI
COMPARACIÓN DE VALORES DE PM10 AL EJECUTAR LAS PRUEBAS DE EXPOSICIÓN DE HUMO EN µG/M3.

Inicial	Mín. P1	Máx. P1	Mín. P2	Máx. P2
5.27	19.24	34.86	20.67	21.65

oscilación existente en los valores adquiridos por el prototipo, se produce por el flujo vehicular en la zona. De este modo, se considera que, la respuesta a la adquisición de datos es adecuada para su funcionamiento en tiempo real. Por último, durante este periodo de prueba se obtiene una estabilidad de conexión superior al 96%; concluyendo que, un promedio de 9 datos no se transmitieron cada día. Este porcentaje puede reducirse manteniendo constante la conectividad del módulo SIM808 durante el tiempo de uso del nodo sensor; pero esto generaría repercusiones en el consumo energético y de datos del prototipo. Para la prueba final, fue necesario ajustar los valores de los delays del código implementado. En las pruebas de conectividad, se determinaron dos tiempos distintos de envío de datos: En la prueba realizada en el domicilio, los datos fueron enviados en un rango de tiempo de 5 minutos aproximadamente; en cambio, para la prueba final del prototipo el tiempo se duplicó.

V. ANÁLISIS Y CORRECCIÓN DE DATOS DE PM ADQUIRIDOS POR EL SENSOR SPS30

Los datos de las estaciones de monitoreo se visualizan en la página perteneciente a la EMOV EP [1]. En primera instancia, se observa dos links: Índice de calidad del Aire y Sistema de monitoreo de calidad del Aire. El segundo link permite visualizar y descargar los valores de varios parámetros de las estaciones 01, 02 y 03. Para nuestro análisis, se utilizó los datos de PM2.5 y PM10 de la estación 01.

El análisis de los datos adquiridos por el sensor SPS30 y la estación automática de la EMOV EP ubicada en el centro histórico de la ciudad se realizó desde el miércoles 17 de enero hasta miércoles 7 de febrero. El prototipo fue ubicado junto a la estación 01, tomando las muestras cada 5 minutos. La visualización de los datos de la EMOV EP se obtiene cada hora, por lo que, fue necesario realizar un promedio de los datos obtenidos por el prototipo, de este modo, se igualó la misma agregación temporal. Dicho análisis se ejecutó en el software libre RStudio, que permite cálculos estadísticos y gráficos. Aquí, se aplicó un modelo de regresión lineal a partir del dataset existente. Esta metodología de estudio consiste en construir un modelo matemático que realice predicciones sobre una variable respuesta (predicha), usando una o más variables predictoras. El uso de una variable predictora se conoce como regresión lineal simple, este método busca una recta adecuada en el plano cartesiano para un conjunto de puntos; es fundamental calcular la correlación entre las dos variables cuantitativas involucradas mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson [35].

V-A. Calibración del nodo sensor

Inicialmente, todas las bases de datos estuvieron en formato csv y texto; siendo transformadas a formato Excel para facilitar su comprensión, organización y depuración. Para el estudio de PM2.5 y PM10 se generaron hojas de datos separadas, dentro del mismo archivo. En la primera columna se colocó la hora y la fecha, en la segunda columna el valor de PM del prototipo y en la tercera columna el valor de PM de la estación automática de la EMOV EP. Inicialmente, se creó una partición de la base de datos, asignando un dataset del 80% al entrenamiento y obtención del modelo de regresión lineal simple y el 20% restante, para predecir los valores, basados en el entrenamiento anteriormente descrito. Para conocer la distribución de los datos previo al entrenamiento, se graficaron los histogramas de los datos de la EMOV EP y del nodo prototipo, determinando en ambos casos una distribución asimétrica positiva.

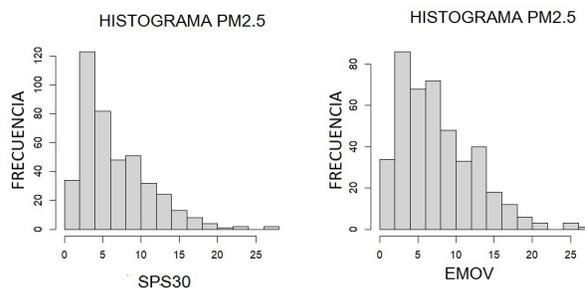


Figura 12. Histogramas de dataset de PM2.5.

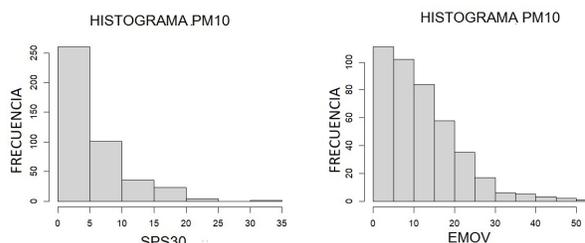


Figura 13. Histogramas de dataset de PM10.

En el análisis realizado en RStudio con el 80% del dataset de entrenamiento, para los datos de PM2.5 se obtuvo el factor de correlación de Pearson de 0.7673877 y el estimador de la desviación típica de los errores es 3.229. Esto se visualiza en la Tabla XII. Por su parte, los datos de PM10 se observan en la Tabla XIII, en donde, el factor de correlación de Pearson de 0.7145745 y el estimador de la desviación típica de los errores es 6.196.

La fórmula de la regresión lineal tiene una ecuación de la forma:

$$Y = a + bX$$

En donde:

- Y= variable dependiente.
- X= variable explicativa.

Tabla XII
INFORMACIÓN DEL ANÁLISIS DE DATOS DE PM2.5.

MODELO ESTADÍSTICO	Regresión Lineal Simple
CORRELACIÓN	0.7673877
RESIDUAL STANDAR ERROR	3.229
MULTIPLE R-SQUARED (R2)	0.5727
ADJUST R-SQUARED	0.5316

Tabla XIII
INFORMACIÓN DEL ANÁLISIS DE DATOS DE PM10.

MODELO ESTADÍSTICO	Regresión Lineal Simple
CORRELACIÓN	0.7145745
RESIDUAL STANDAR ERROR	6.196
MULTIPLE R-SQUARED (R2)	0.4961
ADJUST R-SQUARED	0.4946

- a= intercepto (valor de Y cuando X=0).
- b= pendiente.

La ecuación obtenida para la corrección de datos de PM2.5 es:

$$Y = 2,37872 + 0,81173X$$

Mientras tanto, la ecuación adquirida para la corrección de datos de PM10 es:

$$Y = 5,23475 + 1,33936X$$

Para aplicar el modelo de regresión lineal, se compararon cada una de los dataset de validación con respecto a los datos obtenidos por la predicción del modelo, tanto para PM2.5 y PM10; con un nivel de confianza del 90 %.

Tabla XIV
VALORES DE PM2.5 DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL CON UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 90 %.

SPS30	FIT	LWR	UPR	EMOV EP
2.70	4.57	4.21	4.92	3.97
3.01	5.69	4.82	4.48	5.17
5.46	6.81	6.54	7.09	5.61
9.03	9.71	9.42	10	15.08
2.97	4.79	4.44	5.13	1.84

Tabla XV
VALORES DE PM10 DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL CON UN NIVEL DE CONFIANZA DEL 90 %.

SPS30	FIT	LWR	UPR	EMOV EP
1.15	5.36	4.76	5.97	13.2
6.98	14.01	13.52	14.49	20.7
5.06	11.16	10.70	11.62	11.4
9.1	17.14	16.56	17.71	33.1
2.75	7.731	7.21	8.25	9.7

En las Tablas XIV y XV, se visualiza valores escogidos al azar del data set de validación; cabe concluir que, cuando el valor del prototipo es menor al valor de referencia de la estación automática, la predicción del modelo es muy cercana al valor de referencia, por lo tanto, el modelo es más preciso

tanto para PM2.5 y PM10. En cambio, para los valores de PM2.5, cuando el valor del prototipo es muy cercano o superior al valor de referencia, la predicción del modelo tiende a ser menor al valor de referencia; mientras que, para los valores de PM10, la predicción del modelo aumenta el valor en relación al valor de referencia, en ambos casos disminuye la precisión del modelo. Para finalizar, se obtienen las gráficas referentes a los diagramas de dispersión para los datos de PM2.5 y PM10.

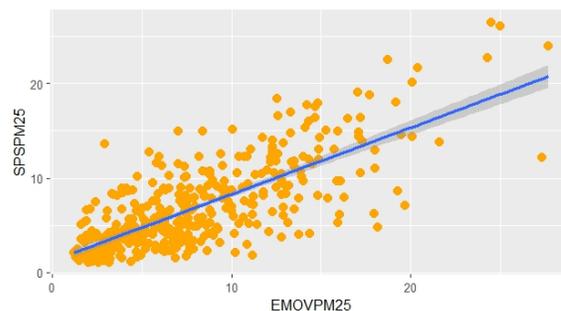


Figura 14. Gráfica del diagrama de dispersión del modelo regresión lineal de PM2.5.

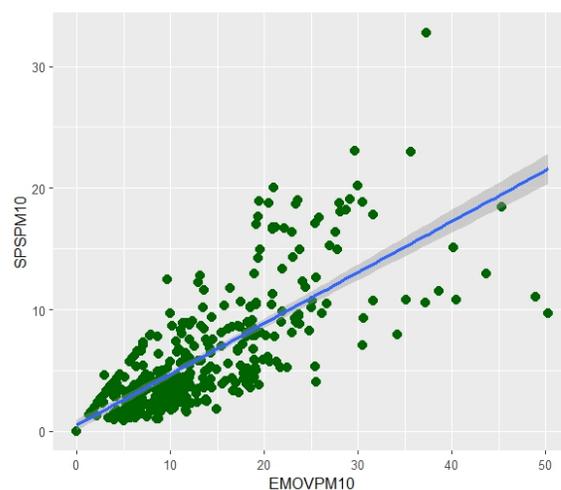


Figura 15. Gráfica del diagrama de dispersión del modelo regresión lineal de PM10.

Con el modelo de regresión lineal previamente entrenado con la partición del 80 % del dataset, se calculó valores de predicción para PM2.5 y PM10 con un nivel de confianza del 90 %. Luego de ello, estos datos son agregados a la partición de validación correspondiente al 20 % restante del dataset. Recopilando los datos, se obtiene nuevamente r2 para PM2.5 y PM10, con el fin de verificar si la aplicación del modelo de calibración efectivamente mejora la relación entre las mediciones del nodo sensor desarrollado y las capturadas por la estación certificada. En las Tablas XVI y XVII se visualiza los valores de la regresión lineal simple calculados para los valores de PM2.5 y PM10, respectivamente.

Tabla XVI
INFORMACIÓN DEL ANÁLISIS DE DATOS DE PM2.5 CON DATOS DE PREDICCIÓN.

MODELO ESTADÍSTICO	Regresión Lineal Simple
CORRELACIÓN	0.8176476
RESIDUAL STANDAR ERROR	2.675
MULTIPLE R-SQUARED (R2)	0.6885
ADJUST R-SQUARED	0.6652

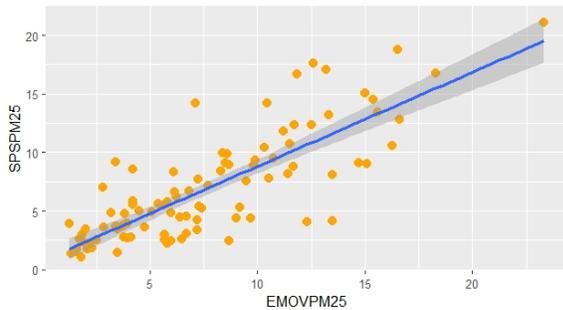


Figura 16. Gráfica del diagrama de dispersión del modelo regresión lineal de PM2.5 con datos de predicción.

Tabla XVII
INFORMACIÓN DEL ANÁLISIS DE DATOS DE PM10 CON DATOS DE PREDICCIÓN.

MODELO ESTADÍSTICO	Regresión Lineal Simple
CORRELACIÓN	0.7145745
RESIDUAL STANDAR ERROR	4.871
MULTIPLE R-SQUARED (R2)	0.5946
ADJUST R-SQUARED	0.5899

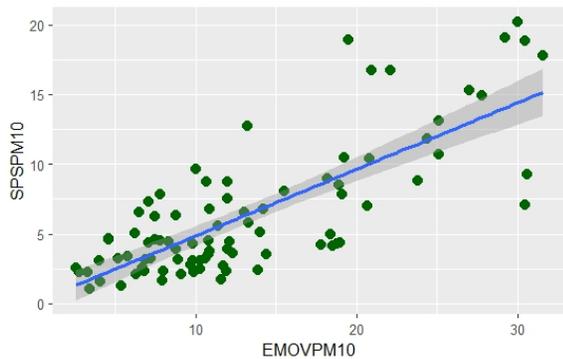


Figura 17. Gráfica del diagrama de dispersión del modelo regresión lineal de PM10 con datos de predicción.

V-B. Implementación final del nodo prototipo

El área de estudio comprendió la zona urbana de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. El prototipo se ubicó en un eje vial de la ciudad, a una distancia considerable de la estación Met One BAM-1020. La batería implementada brinda un voltaje máximo de 8.3V y una corriente de 4600mAh. El módulo SIM808 fue alimentado con una derivación directa de la salida de voltaje que entrega la batería, ya que, su voltaje de operación oscila entre 6V a 12V. Sin embargo, para los demás

componentes del nodo se incorporó un regulador de voltaje para proporcionar un valor de 5V. Además, para mantener la carga de la batería en óptimas condiciones durante varios días, se agregó un panel solar con una capacidad de 20W que permitió una autonomía en la operatividad del prototipo; considerando que, a partir de las 18:00 la única fuente de alimentación es la batería. Para terminar, se realizó el montaje de la placa principal en una caja grande, mientras que, la batería y el regulador del panel solar se colocaron en una caja pequeña, con la finalidad de evitar distorsión o ruido en el registro de datos del prototipo.

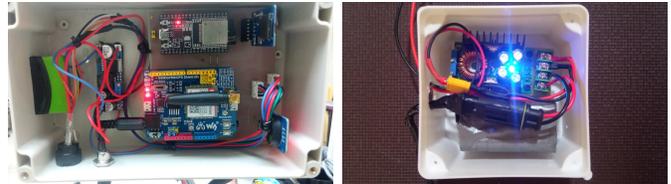


Figura 18. Módulo principal y módulo de carga del prototipo.



Figura 19. Instalación del prototipo en su etapa final.

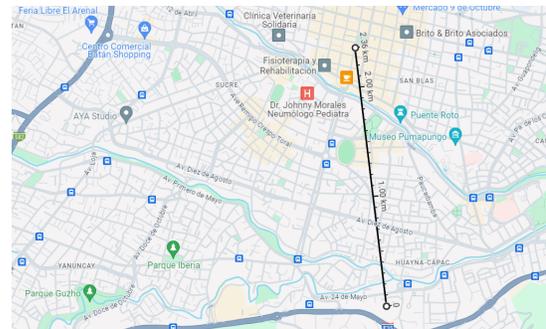


Figura 20. Ubicación final del nodo prototipo y distancia estimada hacia la Estación 01 perteneciente a la EMOV EP.

La prueba final del prototipo, se realizó ubicando el nodo desarrollado en las instalaciones de la Universidad del Azuay.

El prototipo de la Figura 20 se colocó durante 7 días, desde el martes 19 de marzo hasta el lunes 25 de marzo. La distancia lineal entre la estación de monitoreo y la ubicación del nodo según google maps es de 2.36km aproximadamente, es decir, el prototipo está dentro del radio de cobertura de la estación Met One BAM-1020. En este prototipo, se ajustó en el código de programación los datos de PM2.5 y PM10, basados en los valores de las ecuaciones de regresión lineal simple calculadas anteriormente. Los datos adquiridos por el sensor, se guardaron en la microSD y también, se visualizaron por separado en la plataforma de Adafruit IO. Adafruit no dispone de una aplicación para Android o IOS que permita la visualización de los datos desde un dispositivo móvil; por esta razón, para facilitar la accesibilidad a los datos adquiridos por el prototipo, se creó una APP en el software gratuito APP Creator 24, que permite un acceso libre a la información sin necesidad de la creación de un usuario; está disponible con un APK para Android. Aquí, se añadió tres botones:

- Cuenta Adafruit: Verificación de cuenta del usuario que comparte los datos en Adafruit IO.
- Datos PM2.5: Visualización en tiempo real de los datos de PM2.5 adquiridos por el prototipo.
- Datos PM10: Visualización en tiempo real de los datos de PM10 adquiridos por el prototipo.

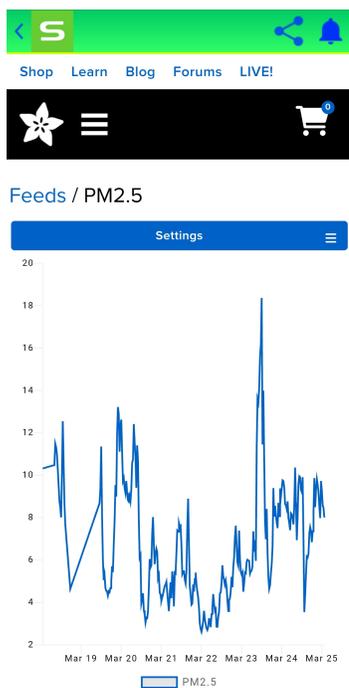


Figura 21. Aplicación Sensirion SPS30, visualizando la gráfica de datos de PM2.5.

Los datos adquiridos por el prototipo fueron comparados en la línea de tiempo con los datos registrados por las estaciones automáticas 01 y 03, pertenecientes a la EMOV EP. En la Figura 23, se observa los datos de las estaciones automáticas durante el periodo de prueba del nodo sensor.

En la Figura 25 se presenta el comportamiento del prototipo

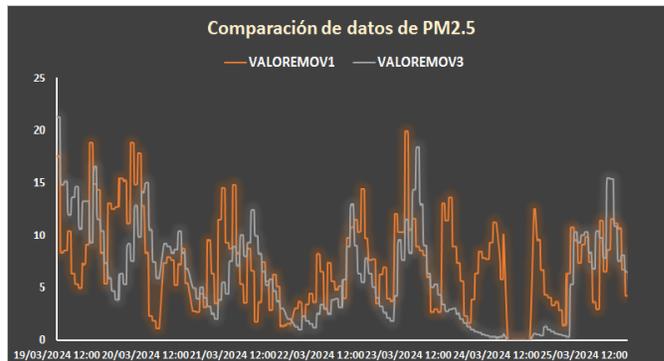


Figura 22. Serie temporal de las mediciones de PM2.5 de la estación 01 y estación 03 durante el periodo de prueba.

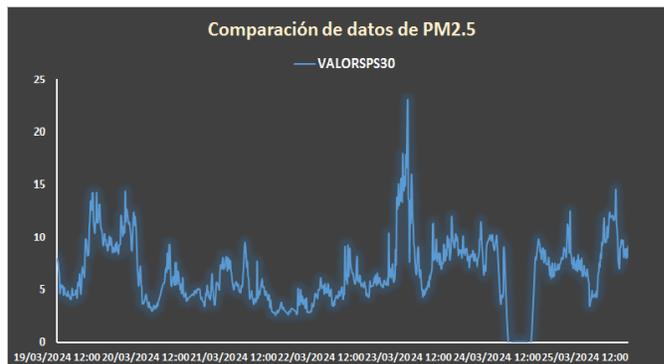


Figura 23. Serie temporal de las mediciones de PM2.5 del prototipo durante el periodo de prueba.

con las estaciones automáticas el martes 19 de marzo. El prototipo registra valores máximos de 13.37 a las 9:10pm y 14.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 9:50pm. En cambio, la estación 01 reporta un valor constante de 18.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 9:50pm; observando que el prototipo sigue la tendencia de los datos reportado por la estación 01. Con la estación 03 se visualiza un ligero desplazamiento en la serie temporal, esta se encuentra distante de la estación 01 y del prototipo, Al parecer, la distancia influye directamente en la adquisición de datos de cualquier estación, incluso si se encuentra dentro del radio de cobertura.

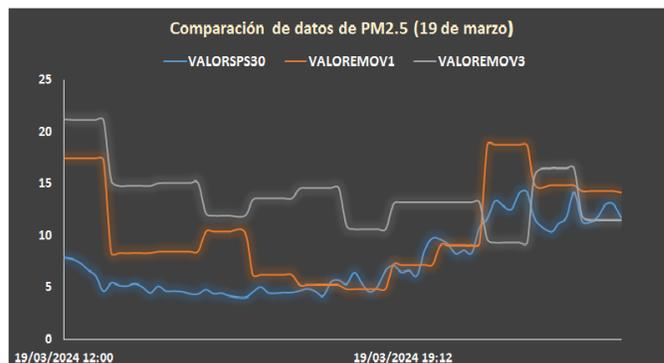


Figura 24. Gráfica de datos de PM2.5 de las estaciones automáticas y el prototipo el martes 19 de marzo.

La estación 03 tuvo una caída significativa en la adquisición de datos, registrando valores inferiores a $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ desde el domingo 24 hasta el lunes 25 de marzo. También se observa que la estación 01 registró valores en $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ entre las 6pm a 10pm del domingo 25; eventos que probablemente están asociados con un incidente en la red de monitoreo. El resto del tiempo, las estaciones registraron los datos de $\text{PM}_{2.5}$.

Analizando los valores de $\text{PM}_{2.5}$ del prototipo, se evidenció que, en el horario de 12:30pm a 15:30pm del miércoles 20 y jueves 21 de marzo registró valores inferiores a $6\mu\text{g}/\text{m}^3$, cuando se supone que dentro de ese rango de tiempo existe flujo vehicular constante en las cercanías de la Universidad. En los mismos días a partir de las 6am, se registraron valores superiores a $7\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la noche, los valores tienden a elevarse a partir de las 6pm, manteniéndose oscilantes hasta las 9pm. El sábado 23 de marzo, se evidenciaron valores de $\text{PM}_{2.5}$ superiores a $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 9am y 12:30pm, siendo un día con reducido flujo vehicular en la zona. Con ello, se evidenció que la detección de PM no solo depende de la emisión de los vehículos, también puede asociarse a factores externos como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y la altura de ubicación del sensor, según sugieren otros estudios.

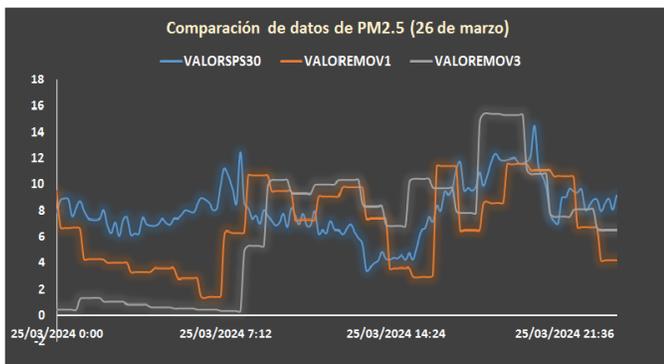


Figura 25. Gráfica de datos de $\text{PM}_{2.5}$ de las estaciones automáticas y el prototipo el 25 de marzo.

Respecto al límite permisible determinado por la legislación ecuatoriana de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, se observó que el prototipo ni las estaciones automáticas sobrepasaron ese límite. En cuanto a los datos adquiridos por el prototipo, se observó que para detectar un valor pico, el valor se eleva progresivamente, a diferencia de las estaciones automáticas que registran una variación mayor a $10\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor más alto registrado por el prototipo fue de $23.07\mu\text{g}/\text{m}^3$ el sábado 23 de marzo a las 11:40am. Por su parte, la estación 01 a la misma hora registró un valor de $19.9\mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor más alto registrado por la estación 03 fue de $21.25\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:50pm del martes 19 de marzo.

VI. FACILIDAD DEL SISTEMA EN RELACIÓN CON LA CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR PM EN LOS EJES VIALES DE CUENCA

El diseño propuesto se realiza basado en la cobertura de la red GSM/GPRS, dado que, el prototipo emplea este tipo de

transmisión de datos, debido a su facilidad de implementación y óptimo rendimiento en la transmisión de datos; además, permite la accesibilidad a lugares sin conexión de internet fijo. Por último, la comunicación inalámbrica permite trasladar el prototipo o reubicarlo en caso de ser necesario. Como referencia, en la Figura 27 se visualiza la cobertura GSM de la red Claro dentro del cantón Cuenca, actualizada al 24 de marzo de 2024. Determinando que, la accesibilidad a la red GSM en la ciudad de Cuenca y sus alrededores permite la escalabilidad del prototipo.

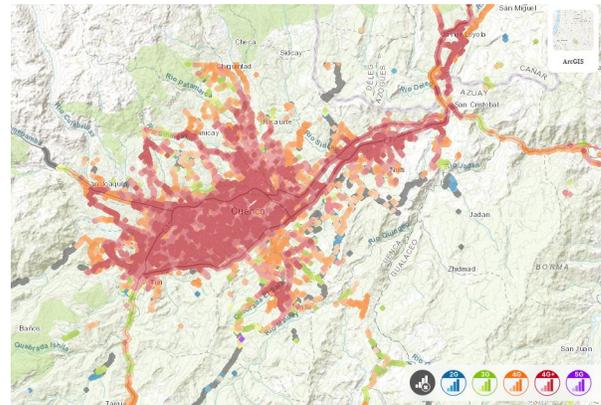


Figura 26. Cobertura GSM en el Cantón Cuenca [36].

Entre los ejes viales externos con un flujo promedio de 40000 vehículos diarios están la Avenida de las Américas y Circunvalación. Entre los ejes viales internos con alto tráfico se tiene a la Avenida Huayna Capac, Solano, 12 de Abril, Remigio Crespo y Ordoñez Lasso. En el centro histórico se estima una circulación de 10000 vehículos al día [37]. En el caso específico del casco histórico, se recomienda ubicar los nodos en sitios con alta presencia de vehículos y peatones, preferentemente en las cercanías de la gobernación y municipalidad, urbanizaciones, centros educativos, parques y centros comerciales, siendo zonas muy transitadas por peatones, ciclistas y automotores. En los ejes viales externos, se sugiere colocar los nodos en urbanizaciones o condominios, centros educativos y redondeles; cabe mencionar que, estas recomendaciones están basadas en estudios previamente realizados [37] [3].

Dentro de la ciudad de Cuenca, las gasolineras se distribuyen a lo largo de los ejes viales internos y externos. El parque industrial, representa el área industrial más importante, está ubicada al Noreste de la ciudad; se estima que funcionan 145 industrias. Fuera del perímetro urbano, existe la zona franca ubicada al Suroeste de la ciudad [37]. En las Figuras 28 y 29, se muestra una ubicación tentativa de los sensores en la Avenida de las Américas; dicha avenida recorre la ciudad de norte a sur y es una de las más extensas. Los puntos de intersección vehicular con la Av. Circunvalación, los redondeles y las gasolineras se consideran puntos de alta concentración vehicular. Además, los lugares de concentración masiva de personas como los centros educativos, comerciales y parques, se incluyeron dentro del análisis. Finalmente, el

sector del Parque Industrial y el Arenal, se consideran como puntos críticos con elevada contaminación, por lo cual, es imprescindible incluirlos en este análisis. En cambio, varios tramos de la Avenida de las Américas se consideraron como áreas semicríticas, ya que, son zonas con vegetación o con moderada movilización vehicular. Según [16], sugiere ubicar cada sensor a una distancia de 500m; en consecuencia, el radio es 250m con un área aproximada de cobertura de 196m² por cada sensor implementado en el eje vial. En este estudio, hay que diferenciar dos áreas, según su nivel de criticidad:

- Área de color rojo (Crítica): Alta movilización vehicular con alta o moderada concentración de ciudadanos.
- Área de color verde (Semi crítica): Moderada movilización vehicular con poca concentración de ciudadanos.



Figura 27. Ubicación de los sensores en la zona norte de la Avenida de las Américas.



Figura 28. Ubicación de los sensores en la zona sur de la Avenida de las Américas.

Luego del análisis realizado, se determina una cantidad de 26 sensores ubicados a lo largo de la Avenida de las Américas; considerando que, sólo en el Parque Industrial se colocaron 4 sensores, debido a la alta emisión de contaminantes en el sector. El diseño de la red de sensores puede escalarse dentro del casco urbano y en los ejes viales restantes de la ciudad, considerando los mismos criterios de estudio. Los nodos sensores instalados conformarían una red de sensores, en donde, cada dispositivo emitirá sus datos en tiempo real. El costo aproximado para la implementación de cada sensor es de 300 dólares, donde se incluye el valor de los módulos necesarios y demás componentes; este valor no incluye costos de envío del sensor, instalación, mantenimiento ni los costos para el uso de la red móvil de telecomunicaciones.

VII. CONCLUSIONES

A partir del marco teórico y estado del arte, se diseñó un nodo prototipo que permita el monitoreo de material particulado basado en sensores de dispersión láser, la tarjeta controladora es un ESP32, con un módulo de comunicación SIM808 que permite una conectividad inalámbrica. De este modo, los valores obtenidos por el prototipo en tiempo real fueron almacenados y visualizados en la plataforma Adafruit IO. Además, se incluyó un módulo reloj de tiempo real (RTC) para registrar la fecha, día y hora, y también, un módulo MicroSD como respaldo de la información.

El módulo SIM808 de la marca Waveshare, brinda una comunicación estable para la transmisión de datos mediante la red GSM/GPRS. Por su parte, el protocolo MQTT presentó eventualidades con el tiempo de enlace a la plataforma Adafruit IO; esto se solucionó al modificar valores de los delays dentro del código de programación. A partir de las pruebas desarrolladas, se determinó que la conectividad inalámbrica es óptima para almacenamiento y visualización de datos en tiempo real, representando una pérdida de datos menor al 4%. Esta pérdida de datos puede estar asociada a la configuración en la programación del módulo, ya que, la conectividad se habilita hasta enviar el dato y posteriormente se apaga, lo que reduce el consumo de energía del prototipo. Además, se destaca la autonomía del dispositivo que tuvo un panel solar de 20W para cargar la batería de 8.3V. El tiempo experimental de autonomía del prototipo es de 12 horas sin presencia de luz solar. En consecuencia, la batería utilizada demostró un óptimo funcionamiento durante varios días, incluso en condiciones de nubosidad.

En las gráficas se evidencia que las distancias entre las estaciones automáticas y el sensor puede ser un factor relevante para la adquisición de datos de PM, ya que, las variaciones entre mediciones son notorias. Por tal motivo, se valida únicamente la información adquirida por el prototipo cuando fue colocado junto a la estación 01, entregando un valor de correlación mejorado tanto para PM_{2.5} y PM₁₀. Adicionalmente, los factores climáticos pueden ser influyentes dentro del análisis de datos de material particulado, reduciendo el desempeño del sensor. Para adquirir mejores resultados, se sugiere implementar varios sensores a una determinada distancia. El costo de implementación de la red de sensores en la Avenida de las Américas bordea los 7800 dólares, un valor accesible en comparación del costo de una estación certificada por la EPA. Además, estos prototipos requieren un mantenimiento preventivo como la limpieza de las placas, el panel solar y los componentes. Por lo tanto, no es necesario contar con un personal técnico calificado. Por último, esta red de sensores permite complementar a la red de monitoreo automática actual, con un análisis focalizado sectorizado, permitiendo la visualización de datos referenciales en tiempo real.

REFERENCIAS

- [1] EMOV-EP, "Calidad del aire," *Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca*, 2024.

- [2] L. Abad, "Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca." *Universidad de Cuenca*, 2016.
- [3] Y. León, "Aplicabilidad del uso de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa en la medición de la calidad del aire: Caso PM 2.5." *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 2021.
- [4] M. Cabrera, "Plataforma de visualización estadística de variables atmosféricas múltiples." *Universidad del Azuay*, 2017.
- [5] WHO, "WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary." *World Health Organization*, 2021.
- [6] M. del Ambiente, "Texto unificado de legislación secundaria del medio ambiente, pág. 296-297," *Disposición dada por Acuerdo Ministerial No. 126, publicado en Registro Oficial Suplemento*, 2017.
- [7] P. Choez, C. González, and F. Mena, "Cálculo referencial de material particulado en el aire como factor de contaminación ambiental en el área urbana de la ciudad de Pujilí." *Universidad Tecnológica Equinoccial*, 2016.
- [8] F. Arrieta, "Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos." *Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia*, 2016.
- [9] J. Paredes, "Plataforma Cloud de monitoreo, adquisición, visualización y predicción de la contaminación del aire, basado en modelos de redes neuronales artificiales." *Universidad Técnica de Ambato*, 2018.
- [10] S. Caicedo, "Diseño de un sistema de tecnologías abiertas para la medición de material particulado en la ciudad de Santa Elena." *Universidad de Guayaquil*, 2017.
- [11] A. Q. Protescan, "Material particulado del aire - origen y clasificación," <https://www.airqualityprotescan.com/blog/materialparticulado2>, 2022.
- [12] A. Ramos and D. Benitez, "Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Sumacá, Boyacá." *Universidad Pedagógica y Tecnología de Colombia*, 2017.
- [13] A. Campo, M. Fernández, and J. Gentili, "Viabilidad temporal del PM10 en Bahía Blanca (Argentina) y su relación con variables climáticas." *Cuadernos gráficos*, 2017.
- [14] A. Astudillo, D. Mejía, D. Moscoso, and R. Zegarra, "Análisis de Partículas Sedimentables y niveles de presión sonora en el área urbana y periférica de Cuenca." *Universidad de Cuenca*, 2018.
- [15] D. Vega, L. Ocaña, and R. Parra, "Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito. Año base 2012." *Universidad San Francisco de Quito*, 2015.
- [16] D. Guerrero and E. Veintimilla, "Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de sensores de bajo costo de material particulado 2,5, ubicados alrededor de dos estaciones de la red de monitoreo atmosférico del DMQ." *Universidad Politécnica Salesiana*, 2021.
- [17] E. Carrión, "Sistema de monitoreo de monóxido de carbono mediante una red de sensores inalámbricos y una plataforma como servicio en la nube para una residencia." *Universidad Técnica del Norte*, 2016.
- [18] D. Ballari, "Mobile sensor networks for environmental monitoring," *Wageningen University*, 2012.
- [19] M. García, "Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la Cordillera Chongón-Colonche." *Universidad Católica Santiago de Guayaquil*, 2019.
- [20] A. Ordoñez and A. Guarrochamba, "Diseño de una WSN para el monitoreo de CO2 en el aire y niveles de ruido en la ciudad de Loja." *Universidad Nacional de Loja*, 2019.
- [21] K. Soto, "Sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Hermosillo, Sonora." *Universidad de Sonora*, 2018.
- [22] J. Carranco and F. Salgado, "Sistema de monitoreo de calidad del aire y ruido ambiental para la determinación de índices de contaminación basado en redes inalámbricas de sensores." *Universidad del Azuay*, 2017.
- [23] M. Roa and R. Manuel, "Verificación de la altura para la medición de PM10 y PM2.5 en calidad del aire como parte del cumplimiento del objetivo y características de los sistemas de vigilancia de calidad del aire (SVCA)." *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 2020.
- [24] K. Vélez, "Estudio de factibilidad de un sistema inalámbrico con sensores para el monitoreo y medición de la calidad del aire ambiental en la Universidad Estatal del sur de Manabí." *Universidad Estatal del sur de Manabí*, 2022.
- [25] B. Bravo and L. Belduma, "Diseño de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo del tránsito vehicular y la contaminación CO2 dentro de un sector urbano." *Universidad Politécnica Salesiana*, 2017.
- [26] J. Wesseling, "Citizen science with common PM2.5 sensors Nova SDS011 and Sensirion SPS30." *National Institute for Public Health and the Environment*, 2021.
- [27] O. Barrios, "Evaluación operacional del desempeño de un sensor de bajo costo para monitoreo de material particulado atmosférico en diferentes condiciones ambientales." *Universidad de Chile*, 2020.
- [28] Sensirion, "Datashet SPS30," *Sensirion AG*, 2020.
- [29] J. Gómez, S. Matute, and T. Negrete, "Diseño de un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos utilizando ESP32 con servidor hospedado en la nube." *Universidad Politécnica Salesiana*, 2021.
- [30] Espressif, "ESP-IDF Programming Guide - Espressif Systems." *Espressif Systems*, 2016-2023.
- [31] SIMCom, "SIM808 Hardware Design." *Shangay SIMCom Wireless Solutions Ltd.*, 2009.
- [32] Megatrónica, "Sim808 Gsm Gprs Gps Con Antena Gps," <https://megatronica.cc/producto/sim808-gsm-gprs-gps-con-antena-gps/>, 2018.
- [33] J. Ayala, A. Anderson, and M. Anderson, "Implementación de un sistema de posicionamiento global para la detección de vehículos en superficies interconectadas ante la inseguridad en el municipio de San Gil." *Unidades Tecnológicas de Santander*, 2019.
- [34] M. I. Products, "DS1307 64 x 8, Serial, I2C Real-Time Clock," *Maxim Integrated Products*, 2015.
- [35] M. Nova, E. Sorza, and L. Zabala, "Adecuación de modelos de regresión lineal simple en R.Studio," *Universidad Cooperativa de Colombia Sede Villavicencio*, 2023.
- [36] nPerf, "Cobertura de Claro Movil en Cuenca, Ecuador," <https://www.nperf.com/es/>, 2024.
- [37] R. Jerves and F. Armijos, "Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador." *Universidad Politécnica Salesiana*, 2016.