

**Diseño de un modelo predictivo para el material particulado PM2.5 utilizando
datos históricos, en la ciudad de Popayán.**

Estudiantes:

Guido Fernando Majin Ibarra

Andrés Camilo Paz Guerrero

Corporación Universitaria Comfacaucá – Unicomfacaucá

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Sistemas

Popayán – Cauca

2025

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los graves problemas para la salud de las personas es la contaminación atmosférica y la mala o baja calidad de aire que se respira. Esta problemática representa una serie de efectos y consecuencias negativas y perjudiciales para la salud humana y la comunidad en general, afectando a múltiples y diversos aspectos de la vida humana. Así pues, el problema está basado en las consecuencias y efectos que se podrían generar en estas personas que se encuentran en zonas que presenta contaminación atmosférica o baja calidad del aire.

La contaminación atmosférica, especialmente el material particulado PM2.5, ha provocado una problemática e inquietud de salud como ambiental. Estos contaminantes en el ambiente pueden provocar problemas y consecuencias de salud en las personas expuestas, tales como enfermedades respiratorias, trastornos en la piel y trastornos cardiovasculares. Además, la exposición prolongada a estos contaminantes puede generar un aumento en la prevalencia del asma y enfermedades crónicas [1].

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo General.

Diseñar un modelo predictivo que permita estimar los niveles de material particulado PM2.5 a partir de variables meteorológicas y temporales, con el fin de anticipar la calidad del aire para fechas específicas en la ciudad de Popayán.

2.2.Objetivos Específicos.

- ❖ Preparar un conjunto de datos históricos, detectando valores atípicos o faltantes.
- ❖ Diseñar y entrenar modelos de regresión o series de tiempo que permitan predecir los niveles de PM2.5 en función de variables ambientales y temporales.
- ❖ Desarrollar una interfaz de entrada para el usuario.

3. JUSTIFICACIÓN

El proyecto propuesto, tiene como fin el diseño de un modelo predictivo, que permita predecir los niveles de contaminación del material particulado, a partir del entrenamiento de un modelo en base a un dataset histórico. Se optó por una solución, porque ofrece varias ventajas, como la posibilidad poder tener una estimación de posibles niveles de material particulado PM2.5 en fecha futuras, y presentarlos de manera accesible a los usuarios finales.

En caso de lograr implementar el modelo propuesto, este aportará beneficios desde diferentes perspectivas. En primer lugar, esto permitirá y facilitará generar predicciones e información precisa sobre la calidad del aire en relación con PM2.5, facilitando la identificación de patrones de contaminación y detección temprana ante situaciones críticas. La información recolectada a partir de la implementación del proyecto será de gran ayuda para que las autoridades locales y la comunidad puedan tomar decisiones y ejecutar acciones preventivas ante esta situación.

Desde al ámbito social, la implementación del proyecto propuesto podrá contribuir a mejorar la calidad de vida de sus habitantes, dado que, al contar con modelo predictivos sobre la calidad del aire, se podrán tomar acciones frente a la problemática para disminuir la exposición a estos contaminantes.

Desde el punto de vista ambiental, el proyecto contribuirá al control y reducción de emisiones contaminantes. Al identificar los momentos y puntos de mayor contaminación, será posible implementar estrategias de mitigación más efectivas. Esto, a largo plazo, ayudará a preservar los ecosistemas locales y a fomentar un entorno más limpio y saludable.

Tecnológicamente, la iniciativa del proyecto podrá fomentar el uso de tecnologías como el IoT y el análisis de datos, en soluciones a problemas ambientales. El uso de estas tecnologías podría generar oportunidades de investigación y el desarrollo de futuras aplicaciones, sirviendo este proyecto como referencia para la replicación de soluciones similares en otras zonas afectadas.

En síntesis, este proyecto responde a una necesidad de las personas de la ciudad de Popayán, este proyecto no solo busca generar información sobre los contaminantes

atmosféricos, sino contribuir al bienestar de los habitantes de esta zona, la protección del medio ambiente y el desarrollo tecnológico.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1.Estado del arte

El monitoreo y predicción del material particulado, especialmente PM_{2.5}, ha ganado atención considerable en los últimos años debido a sus efectos adversos en la salud pública y el medio ambiente. El material particulado PM_{2.5} son partículas cuyo diámetro es inferior a 2.5 micrómetros, estas partículas son capaces de penetrar profundamente en el sistema respiratorio de las personas, provocando enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido límites para los niveles aceptables de PM_{2.5} para reducir los riesgos asociados a la exposición prolongada.

Tabla 1. Directrices de calidad del aire del material particulado.

PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	
70	35	15% Mayor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con los niveles de AQG
50	25	6% Menor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con el Nivel 1
30	15	6% Menor riesgo de mortalidad a largo plazo en relación con el Nivel 2
20	10	Nivel más bajo en presentar aumento al riesgo a la salud en respuesta a la exposición a largo plazo a PM _{2.5}

Fuente: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire/calidad-aire-ambiente>

Con el avance de la tecnología, el Internet de las Cosas (IoT) ha emergido como una solución prometedora para el monitoreo ambiental. Sensores de bajo costo y redes de comunicación inalámbrica permiten la recopilación y transmisión continua de datos en tiempo real. Proyectos recientes han demostrado la viabilidad de usar sensores IoT para medir niveles de PM_{2.5} y otros contaminantes del aire, logrando una mayor cobertura geográfica a un costo reducido.

Entre los estudios revisados en la literatura se encontraron las siguientes implementaciones de monitoreo de material particulado PM_{2.5}:

Resumen	Tecnología implementada	Resultados obtenidos	Referencia
Desarrollo de una estación portátil de monitoreo ambiental y de calidad del aire basada en IoT, capaz de medir parámetros como temperatura, presión,	*Sensores: AHT10 (temperatura y humedad), MQ-7 (CO), BMP280 (presión), ZP07-MP503 (VOC) y PMS5003 (PM _{2.5} y PM ₁₀). *Microcontroladores: Arduino	*Los sensores demostraron ser precisos con pequeñas desviaciones en las mediciones de temperatura, humedad y presión.	[2]

humedad, altitud, PM2.5, PM10, VOC y CO, utilizando una combinación de sensores y tecnologías de comunicación para recopilar y transmitir datos en tiempo real a través de una plataforma en la nube y una aplicación móvil.	UNO y Node MCU con módulo Wi-Fi ESP8266. *Conectividad: Wi-Fi y GSM para transmisión de datos. *Plataforma en la Nube: ThingSpeak para almacenamiento. *Aplicación Móvil: desarrollada con Android Studio.	*Desarrollo del aplicativo móvil para la visualización de los datos.	
El artículo describe el desarrollo de un prototipo para la medición de partículas PM2.5 en la ciudad de Bogotá. El proyecto se enfoca en diseñar y validar un dispositivo capaz de monitorear la calidad del aire mediante el uso de sensores ópticos.	*Sensores: GP2Y1010AU0F (Sensor óptico de polvo y humo basado en el principio de dispersión de luz para la medición de partículas PM2.5). Micronefelómetro (dispositivo de elaboración propia que también utiliza el principio de dispersión de luz para detectar partículas en el aire) *Microcontroladores: Arduino Uno. *Transmisión de Datos: Módulo Bluetooth HC-05. *Procesamiento y Visualización de Datos: PLX-DAQ V2, MIT App Inventor 2.	*El sensor GP2Y1010AU0F mostró variabilidad en sus mediciones, con un voltaje offset notablemente diferente entre unidades. *El micronefelómetro, a pesar de ser un prototipo preliminar, mostró una relación proporcional entre el voltaje.	[3]
Este artículo detalla el desarrollo de un prototipo electrónico para medir y recopilar datos sobre la calidad del aire en el bloque 1 de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá. El objetivo principal es diseñar un dispositivo que monitoree continuamente factores como el material particulado, contaminantes atmosféricos y gases peligrosos.	*Microcontrolador: Arduino. *Sensores: MQ-135 (detección de gases y material particulado dañinos), MQ-9 (detección de monóxido de carbono y otros gases combustibles), DTH-11 (sensor para medir la temperatura y humedad). *LCD OLED: Pantalla para mostrar los valores. *Buzzer: Zumbador electroacústico para emitir alertas sonoras en caso de alta contaminación.	El prototipo permitió medir y recopilar datos en tiempo real sobre la calidad del aire en el bloque 1 de la universidad, proporcionando información valiosa que puede ser utilizada para desarrollar estrategias de mitigación de la contaminación.	[4]
El artículo describe el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de contaminación de aire basado en IoT para la región central de Panamá. Se propone la implementación de pequeñas estaciones de monitoreo distribuidas en áreas densamente pobladas, que utilizan sensores para medir diversos contaminantes del aire.	*Sensores: usaron sensores para medir O3 (ozono), CO (monóxido de carbono), SO2 (dióxido de azufre), NO2 (dióxido de nitrógeno), PM10 y PM2.5 (material particulado). *Microprocesadores: Cada estación está equipada con un microprocesador que recopila los datos de los sensores y los envía a la base de datos. *AEROQUAL Serie 500: equipos comerciales utilizados para validar la precisión de las mediciones de los sensores en condiciones controladas de laboratorio y en el campo. *La red de comunicación está basada en IoT.	El sistema propuesto es capaz de medir en tiempo real los niveles de contaminantes del aire en diversas regiones de Panamá. Las pruebas realizadas con el equipo AEROQUAL Serie 500 mostraron que los sensores instalados en las estaciones proporcionan mediciones precisas y confiables.	[5]
El artículo describe el diseño de un sistema de bajo costo para la medición de parámetros	*Placas de desarrollo como Arduino Mega 2560, y módulos adicionales para almacenamiento y	*Los sensores calibrados proporcionaron mediciones precisas y confiables.	[6]

asociados a la calidad del aire. El sistema se basa en hardware y software abiertos, combinado con sensores de bajo costo. El prototipo es autónomo energéticamente y puede operar de manera aislada o conectado a una plataforma de IoT. Se ha evaluado su desempeño a lo largo de varios meses en diferentes ubicaciones de la región central de Cuba.	comunicación. *Sensores electroquímicos de la firma Alphasense para medir contaminantes como SO₂, CO, O₃, NO₂ y material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀). *Integración con la plataforma Thingsboard para gestión IoT, utilizando protocolos MQTT y HTTP. *Sistema de energía basado en panel solar y batería de plomo-ácido para garantizar operación continua sin conexión a la red eléctrica.	*El sistema demostró ser capaz de operar de manera autónoma durante varios días sin problemas. *Se logró recopilar y transmitir datos en tiempo real sobre la calidad del aire. *El sistema mostró ser robusto y fiable, capaz de operar en condiciones climáticas adversas y ambientes hostiles.	
El proyecto describe el diseño e implementación de un prototipo destinado a medir, analizar y purificar los contaminantes del aire. La solución se centra en la creación de un sistema de monitoreo que recopila datos en tiempo real mediante sensores electroquímicos y muestra la información tanto de forma local como remota.	*Arduino Mega. *Pantalla HMI Nxtion: Permite la visualización local de datos. *Sensores Electroquímicos. *Sensor de Partículas (PMS5003). *Sensor DHT11. *Módulo Wi-Fi ESP8266. *Plataforma IoT: Ubidots. *Se usó AutoCAD para diseñar la estructura física del prototipo.	*Se logró detectar y cuantificar de manera precisa las concentraciones de los distintos gases (CO₂, NO₂, NH₃, CO, O₃) y partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}), así como parámetros ambientales como la temperatura y la humedad. *Los datos se visualizan en tiempo real en la pantalla HMI Nxtion, y se transmiten a la plataforma Ubidots, donde se generan gráficos.	[7]
El objetivo principal es desarrollar un prototipo de bajo costo capaz de estimar la concentración de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) en el ambiente en Perú.	*Arduino Uno R3. *Sensor de partículas DSM-501. *Módulo RTC DS3231: Permite la sincronización temporal de las mediciones para asociar cada dato con la hora exacta. *Módulo adaptador LCD a I2C – PCF8574 y Display LCD 1602: Facilitan la visualización local de las mediciones. *Módulo lector de memoria MicroSD Card. *Panel Solar 18V 10W.	El prototipo es capaz de estimar de manera efectiva la concentración de material particulado en el aire.	[8]
En el artículo se evalúa la calidad del aire en la ciudad de Rafaela (Argentina) mediante el monitoreo continuo de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀).	*Dispositivo AirVisual Pro: instrumento digital que utiliza tecnología láser para medir la concentración de partículas en el aire (PM_{2.5} y PM₁₀). *Sensores de Material Particulado. *Conectividad Inalámbrica (WIFI).	Se identificaron concentraciones elevadas de material particulado durante los meses de invierno (junio, julio y agosto), cuando factores como el uso intensivo de leña para calefacción y el aumento en la circulación de vehículos agravan la contaminación.	[9]
El artículo aborda el problema de la contaminación ambiental causada por el material particulado. Con el objetivo de proporcionar una herramienta de	*Raspberry Pi 3 B+: Actúa como la unidad central de control, ofreciendo capacidad de procesamiento y conectividad para la adquisición de datos.	El sistema embebido permite la generación de mapas de contaminación que reflejan la distribución espacial de las concentraciones de PM_{2.5} y	[10]

monitoreo móvil y de bajo costo, los autores desarrollaron un sistema embebido adaptable a diversas estructuras. Este dispositivo recopila datos en tiempo real de las concentraciones de PM2.5 y PM10 y, mediante una interfaz gráfica conectada a la red, genera mapas de intensidad de contaminación que permiten visualizar de forma espacial las zonas afectadas.	*Sensor PMS5003: Mide la concentración de material particulado (PM2.5 y PM10) con alta resolución. *Módulo DHT22: Registra parámetros ambientales de humedad y temperatura. *Módulo GPS Neo-6M: Permite la geolocalización precisa de cada medición, facilitando la generación de mapas de intensidad. *Sistema de alimentación: Incluye una batería intercambiable y un sistema de alimentación externa para garantizar la operatividad en campo.	PM10. Estos mapas muestran la intensidad de la contaminación a través de escalas de colores, facilitando la identificación de focos críticos en zonas de alto flujo vehicular y actividad urbana.	
El artículo presenta una propuesta de implementación inicial de una red de monitoreo de la calidad del aire en El Salvador, utilizando tecnologías IoT. El estudio desarrolla una arquitectura IoT que permite medir, en tiempo real, parámetros críticos como la concentración de material particulado (PM2.5 y PM10), temperatura y humedad. Los datos se envían a una plataforma en la nube que ofrece un panel web para la visualización y análisis.	*Controlador ESP32. *Sensor PMS5007: Mide la concentración de partículas (PM2.5 y PM10) con alta resolución. *Sensor DS18B20: Registra la temperatura ambiente. *Pantalla OLED. *Conectividad: redes WIFI o GSM/GPRS. *Dashboard Web: desarrollado para presentar la información en tiempo real mediante tableros interactivos que muestran mapas de monitoreo y estadísticas.	La plataforma web permitió la generación de dashboards que facilitan la interpretación de los datos y la identificación de focos críticos de contaminación, ofreciendo así una herramienta valiosa para la toma de decisiones y la implementación de medidas de control ambiental.	[11]
El artículo presenta un sistema de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real basado en tecnologías IoT, diseñado para entornos que favorezcan una vida mejorada. La propuesta integra un sistema ciberfísico para la adquisición de datos (medición de CO₂) y utiliza tecnologías de computación móvil para mapear la calidad del aire considerando la información espacial y temporal.	*Microcontrolador ESP32 (Heltec LoRa 32). *Sensor de CO₂ (DFRobot MH-Z14). *Sistema de Gestión de Batería Li-Po. *Bluetooth Low Energy (BLE). *Wi-Fi. *Aplicación Móvil (desarrollada en Swift) *Backend con Base de Datos (MS SQL Server) *Arquitectura Ciberfísica y Mobile Computing.	*Se logró integrar de manera exitosa el hardware y el firmware, permitiendo la recolección de datos de CO₂ en tiempo real. *La aplicación móvil proporciona acceso en tiempo real a los datos, mostrando tanto las concentraciones de CO₂ como la ubicación geográfica (a través de GPS).	[12]
El artículo presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del aire basado en IoT, diseñado para medir y gestionar la contaminación atmosférica de manera eficiente y a bajo costo. El sistema utiliza sensores de gas conectados a un microcontrolador (Arduino) para captar datos de gases contaminantes (como NO_x, CO, CO₂ y SO₂) y otros parámetros	*Arduino Uno *Sensores de Gas (MQ2, MQ135, entre otros). *Módulo NodeMCU: Permite la transmisión de los datos a la nube a través de Wi-Fi. *Módulos GSM y GPS: Facilitan la comunicación y la geolocalización de las mediciones. *DHT11. *Aplicación Web/Android.	*El sistema consigue recopilar y transmitir datos ambientales de forma continua, ofreciendo información actualizada sobre los niveles de contaminación en la zona de estudio.	[13]

ambientales (temperatura, humedad y partículas en suspensión). La información se transmite en tiempo real a la nube a través de módulos de conectividad (NodeMCU, GSM, GPS) y se visualiza mediante una aplicación web. Además, el sistema incorpora algoritmos de predicción.			
El artículo presenta el desarrollo y validación de un prototipo de sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo del material particulado (PM10 y PM2.5) en la ciudad de Chitré, Panamá. La validación se realizó en un entorno cercano a un vertedero, demostrando que el prototipo es viable y que proporciona patrones interesantes en la medición de la contaminación, lo que lo hace competitivo frente a soluciones comerciales.	*Sensor Nova PM SDS011: detecta partículas suspendidas en el aire (polvo, suciedad, hollín y humo) para medir las concentraciones de PM10 y PM2.5. *Arduino Yun. *Ventilador de 5V y Carcasa Protectora: Se diseñó y optimizó una carcasa (fabricada en PLA mediante impresión 3D) para alojar el sistema, garantizando la protección del hardware sin afectar las mediciones. *Comunicación Wi-Fi. *Plataforma ThingSpeak.	*El prototipo fue implementado cerca de un vertedero en Chitré, Panamá, un área expuesta a la contaminación, donde se realizó un estudio para determinar las concentraciones de material particulado. *Los resultados demostraron que el sensor Nova PM SDS011 es confiable, ya que mostró patrones de medición consistentes con estudios previos y con sensores de alta precisión, presentando un error porcentual mínimo.	[14]
En el artículo se plantea una investigación sobre la relación entre la concentración de aire saturado y las partículas PM2.5 en la ciudad de Potosí, Bolivia.	Se utilizaron dispositivos de medición (marca TROTEC) y data loggers para cuantificar la concentración de aire saturado y partículas PM2.5.	El análisis cuantitativo confirmó que los niveles elevados de PM2.5 son elevados	[15]
El estudio propuesto en el artículo se centra en el monitoreo de la calidad del aire, mediante un dispositivo basado en Arduino diseñado para analizar la concentración de partículas PM2.5. El trabajo aborda la problemática de la contaminación atmosférica generada por el crecimiento urbano, la quema de residuos y la dinámica poblacional, y propone que el monitoreo continuo de estas concentraciones puede facilitar la toma de medidas preventivas y correctivas.	*Dispositivo Arduino. *Sensor de PM2.5. *Módulos de Conectividad: Wi-Fi.	*Durante el periodo de estudio, el dispositivo registró 80,640 datos de concentración de PM2.5, lo que permitió analizar la distribución de los niveles de contaminación a lo largo de diferentes meses. *Se observó que, aunque los promedios diarios de PM2.5 se mantienen por debajo de los límites permisibles.	[16]
El artículo presenta un estudio que presenta un nuevo modelo llamado Causal-STAN (Spatio-Temporal Attention Causal Convolutional Neural Network)	*Redes Neuronales Convolucionales (CNN): Para la extracción de características espaciales y temporales de los datos de calidad del aire.	*Mostró un rendimiento superior en la predicción de concentraciones de PM2.5 en comparación con seis modelos de línea base, incluyendo	[17]

para la predicción de concentraciones de PM2.5 en múltiples sitios en la región del Delta del Río Yangtsé, China.	*Módulo de Integración de Características Sptio-Temporales: Que identifica tendencias locales temporales y correlaciones espaciales. *Bloque Residual Direccional: Para capturar características direccionales de la dispersión de PM2.5 entre estaciones. *Mecanismo de Atención Causal: Que permite el análisis de dependencias a largo plazo en las series temporales.	técnicas avanzadas como GRU y LSTM. *Se observaron métricas de rendimiento como el RMSE (Error Cuadrático Medio) y MAE (Error Absoluto Medio) más bajos en comparación con los demás modelos, lo que indica una mayor precisión en las predicciones.	
En el artículo se aborda la problemática de la contaminación atmosférica en Bogotá, centrándose en el material particulado PM2.5. El objetivo general es desarrollar un prototipo basado en redes neuronales que permita predecir los niveles de contaminación (PM2.5) en una zona específica de Bogotá. Los objetivos específicos incluyen la normalización de los datos, la selección de la arquitectura y de los algoritmos de aprendizaje, y la validación del prototipo.	Redes neuronales	Los resultados obtenidos permiten predecir la contaminación (PM2.5) con cierto grado de precisión, demostrando la viabilidad del uso de redes neuronales para la predicción de contaminantes atmosféricos en entornos urbanos	[18]

5. MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del proyecto, se tendrán en cuenta unas actividades que están sujetas a los objetivos específicos propuestos anteriormente, donde en cada objetivo específico, se tendrán propuestas unas actividades o tareas para el cumplimiento de este.

Estos objetivos son:

Preparar un conjunto de datos históricos, detectando valores atípicos o faltantes.

Para el desarrollo de este objetivo se planteó las siguientes actividades:

- ❖ Descargar o extraer los datos históricos en formato digital (CSV, Excel, APIs, etc.).
- ❖ Detectar y tratar valores atípicos y datos faltantes mediante eliminación.

Diseñar y entrenar modelos de regresión o series de tiempo que permitan predecir los niveles de PM2.5 en función de variables ambientales y temporales. Para el desarrollo de este objetivo se planteó las siguientes actividades:

- ❖ Seleccionar variables de entrada (features) relevantes.
- ❖ Transformar variables temporales (extraer hora, día, mes, día de la semana).
- ❖ Dividir los datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba.
- ❖ Probar diferentes algoritmos de regresión (Random Forest, XGBoost, redes neuronales, etc.).

Desarrollar una interfaz de entrada para el usuario. Para el desarrollo de este objetivo se planteó las siguientes actividades:

- ❖ Definir el diseño de la interfaz (CLI, aplicación web, dashboard, etc.).
- ❖ Implementar una interfaz básica para que el usuario seleccione una fecha.
- ❖ Cargar el modelo entrenado y vincularlo con la entrada del usuario.
- ❖ Mostrar la predicción de PM2.5 de forma clara.

6. PRESUPUESTO

Concepto		Valor unitario	Cantidad	Valor total
Equipos	Computador	\$ 2.000.000,00	1	\$ 2.000.000,00
TOTAL				\$ 2.000.000,00

REFERENCIAS

- [1] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, and E. Bezirtzoglou, "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review," *Front. Public Heal.*, vol. 8, no. February, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [2] M. N. M. Aashiq *et al.*, "An IoT-based handheld environmental and air quality monitoring station," vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2023, [Online]. Available: www.imeko.org
- [3] B. Fish, "DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA MEDICIÓN DE PARTÍCULAS PM2.5 EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ," vol. 2507, no. February, pp. 1–9, 2020.
- [4] J. D. P. P. Y. S. V. Castro, "Diseño De Un Prototipo Electrónico Para La Medición Y Recopilación De Datos De Calidad Del Aire En El Bloque 1 De La UCC Sede Bogotá," *Estereotipos femeninos desde la antigüedad clásica Hast. el siglo XVI*, pp. V–VI, 2022, doi: 10.1515/9783110756029-toc.
- [5] O. D. de León, B. Cedeño, E. Collado, Y. Sáez, and F. Canto, "Diseño De Un Sistema Basado En Internet De Las Cosas Para Monitoreo De Contaminantes De Aire," *Proc. 19th LACCEI Int. Multi-Conference Eng. Educ. Technol. "Prospective trends Technol. Ski. Sustain. Soc. Dev. "Leveraging Emerg. Technol. to Constr. Futur.*, 2021, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252082929>
- [6] E. Hernández Rodríguez, A. Martínez, O. Schalm, R. Amalia González Rivero, and L. Hernández Santana, "Diseño de un sistema de medición y monitoreo de variables asociadas a calidad del aire," *Rielac*, vol. 44, no. 2, p. 2304, 2023.
- [7] Guatapi., G. B, E. I., and A. Mauricio, *Diseño e implementación de un prototipo para un sistema de medición, análisis y purificador de gases contaminantes en el aire utilizando Arduino y Ubidots IoT*. 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24088>
- [8] Jhon Martínez Alva Juan; Jiménez García, "Estimación De Material Particulado Mediante La Implementación De Un Prototipo De Bajo Costo," *Univ. Nac. Jaén*, p. 114, 2023, [Online]. Available: <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/566>
- [9] M. Carrel, A. Fissore, and M. Carrel, "Evaluación de la calidad de aire en la Ciudad de Rafaela mediante monitoreo de Material Particulado.," pp. 1–6, 2024.
- [10] J. E. Eslava Pedraza, F. A. Martínez Sarmiento, Á. J. Soto Vergel, E. J. Vera Rozo, and D. Guevara Ibarra, "Generación de mapas de contaminación por material particulado mediante sistemas embebidos: caso de estudio en Cúcuta (Colombia)," *Rev. Logos, Cienc. Technol.*, vol. 13, no. 3, 2021, doi: 10.22335/rlct.v13i3.1433.
- [11] O. O. Flores-Cortez and J. R. C. Hernández, "Implementación de una red de monitoreo de la calidad del aire utilizando tecnologías IoT de bajo costo, caso de estudio El Salvador," *South Florida J. Dev.*, vol. 5, no. 7, p. e4082, 2024, doi: 10.46932/sfjdv5n7-003.
- [12] G. Marques, N. Miranda, A. K. Bhoi, B. Garcia-zapirain, S. Hamrioui, and I. de la T. Díez, "Internet of things and enhanced living environments: Measuring and

mapping air quality using cyber-physical systems and mobile computing technologies,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 3, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/s20030720.

- [13] B. VeeraReddy, N. Boorla, B. S. Kakarlapudi, D. S. Nadirge, and B. Siripangi, “IoT Based Air Quality Monitoring System,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2794, no. 1, 2023, doi: 10.1063/5.0173454.
- [14] E. Quintero, J. González, F. García, Y. Sáez, and E. Collado, “IoT-based system prototype for particulate matter monitoring in the city of Chitre, Panama,” *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2023-July, pp. 1–7, 2023, doi: 10.18687/laccei2023.1.1.847.
- [15] R. C. Vera, H. Chirveches S., and J. Ricaldi P., “Monitoreo ambiental de concentración de aire saturado y partículas PM2.5 para la prevención de la Salud Ocupacional en la Ciudad de Potosí a 4000m.s.n.m.,” *Mediciencias UTA*, vol. 5, no. 2, p. 61, 2021, doi: 10.31243/mdc.uta.v5i2.1086.2021.
- [16] N. M. Ocampo Espinoza and V. M. Portillo Sosa, “Monitoreo de la Calidad del Aire con Dispositivo Arduino: Análisis de Datos de PM2.5 en la Ciudad de Pilar,” *Rev. Verit. Difusão Científica*, vol. 5, no. 1, pp. 72–86, 2024, doi: 10.61616/rvdc.v5i1.63.
- [17] Y. Wang, S. Tian, and P. Zhang, “Novel spatio-temporal attention causal convolutional neural network for multi-site PM2.5 prediction,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, no. September, pp. 1–15, 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1408370.
- [18] J. C. Pedraza, “Prototipo de un modelo de machine learning para la predicción de partículas de contaminación atmosférica finas, en la localidad de Kennedy en Bogotá,” p. 57, 2019, [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/15772/PedrazaCameloJuanCamilo2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>