

# AI-powered prototype for intelligent air quality monitoring in industrial environments

Hidalgo, Miguel<sup>1</sup>, Rangel, Jose Carlos<sup>2</sup>, Gonzalez-Olivardia, Franchesca<sup>3</sup>, Acosta Reyes, Adiz Mariel<sup>1</sup>, Vásquez Sanjur, Harold Paul<sup>1</sup>, Cruz, Delvis Joel<sup>1</sup> and \*Cruz, Edmanuel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Regional Veraguas, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá City 0819-07289, Panamá

miguel.hidalgo, jose.rangel, francesca.gonzalez, adiz.acosta, harold.vasquez, delvis.cruz, \*edmanuel.cruz {@utp.ac.pa}

<sup>2</sup>Faculty of Computer Systems Engineering, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama City 0819-07289, Panama

<sup>3</sup>Research Group Air Engineering Studies (AirES), Universidad Tecnológica de Panamá, Panama City 0819-07289, Panama

*Abstract– Just like at home, breathing clean air is vital in the workplace. Unfortunately, dust, gases, and other pollutants can compromise air quality in industrial buildings, posing risks to worker health, safety, productivity, and compliance with regulations. To address this, a new research project developed an intelligent air pollution monitoring system for industrial settings. This system leverages artificial intelligence technologies and software to analyze real-time sensor data, identifying potential health hazards. Implemented in a real industrial building, the prototype performed successfully, accurately detecting air pollution, and alerting workers to potential risks.*

*Keywords-- Artificial intelligence, air quality monitoring, industrial buildings.*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Prototipo basado en IA para el monitoreo inteligente de calidad del aire en entornos industriales

AI-powered prototype for intelligent air quality monitoring in industrial environments

Hidalgo, Miguel<sup>1</sup>, Rangel, José Carlos<sup>2</sup>, Gonzalez-Olivardia, Franchesca<sup>3</sup>, Acosta Reyes, Adiz Mariel<sup>1</sup>, Vásquez Sanjur, Harold Paul<sup>1</sup>, Cruz, Delvis Joel<sup>1</sup> and Cruz, Edmanuel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Regional Veraguas, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá City 0819-07289, Panamá

miguel.hidalgo, jose.rangel, franchisesca.gonzalez, adiz.acosta, harold.vasquez, delvis.cruz, edmanuel.cruz {@utp.ac.pa}

<sup>2</sup>Faculty of Computer Systems Engineering, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá City 0819-07289, Panamá

<sup>3</sup>Research Group Air Engineering Studies (AirES), Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá City 0819-07289, Panamá

**Abstract**– *Just like at home, breathing clean air is vital in the workplace. Unfortunately, dust, gases, and other pollutants can compromise air quality in industrial buildings, posing risks to worker health, safety, productivity, and compliance with regulations. To address this, a new research project developed an intelligent air pollution monitoring system for industrial settings. This system leverages artificial intelligence technologies and software to analyze real-time sensor data, identifying potential health hazards. Implemented in a real industrial building, the prototype performed successfully, accurately detecting air pollution, and alerting workers to potential risks.*

**Keywords**– *Artificial intelligence, air quality monitoring, industrial buildings.*

**Resumen**– *Al igual que en casa, respirar aire limpio es vital en el lugar de trabajo. Lastimosamente, el polvo, los gases y otros contaminantes pueden comprometer la calidad del aire en los edificios industriales, lo que supone un riesgo para la salud, la seguridad, la productividad y el cumplimiento de la normativa por parte de los trabajadores. Para solucionar este problema, se ha desarrollado este proyecto de investigación que consiste en un sistema inteligente de control de la contaminación del aire en entornos industriales. Este sistema aprovecha las tecnologías y el software de inteligencia artificial para analizar en tiempo real los datos de los sensores e identificar posibles riesgos para la salud. El prototipo, implementado en un edificio industrial real, funcionó con éxito, detectó con precisión la contaminación del aire y alertó a los trabajadores de posibles riesgos.*

**Palabras clave**– *Inteligencia artificial, control de la calidad del aire, edificios industriales*

## I. INTRODUCCIÓN

La mala calidad del aire en espacios interiores acarrea una amplia gama de problemas de salud, que van desde la irritación ocular y congestión nasal, hasta enfermedades respiratorias crónicas y graves como el asma y la enfermedad

pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Estos riesgos para la salud resaltan la importancia crítica de mejorar la calidad del aire en dichos entornos. Por consiguiente, resulta de vital importancia contar con información en tiempo real acerca de la calidad del aire, así como identificar posibles fuentes de contaminación y adoptar medidas preventivas o correctivas de manera oportuna. Esto permitirá salvaguardar la salud de las personas y preservar un entorno laboral seguro y saludable.

### A. Importancia del Monitoreo de la Calidad del Aire

Habitualmente el ser humano permanece hasta el 90% de su vida en interiores: en casa, en el trabajo, en el gimnasio, en la escuela, en unidades de transporte, tiendas, restaurantes, etc. En estos entornos cerrados el ser humano queda limitado a respirar el aire contenido en el lugar. La calidad del aire que se respira en interiores tiene un impacto directo en la salud. En los lugares mal ventilados, las emisiones de PM<sub>2,5</sub> y otros contaminantes pueden ser 100 veces superiores a los niveles recomendados por la OMS [1].

La información en tiempo real sobre la calidad del aire, la identificación de fuentes de contaminación y la implementación de medidas preventivas y correctivas son acciones fundamentales para proteger la salud de los trabajadores y mantener un ambiente laboral adecuado.

Este estudio tiene como objetivo el desarrollo de un prototipo de sistema de monitoreo inteligente para medir y analizar la calidad del aire en entornos industriales. El prototipo se implementó y probó en el entorno industrial de la Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional Veraguas (Figura 1).



Figura 1: Ubicación del entorno industrial de la Universidad Tecnológica de Panamá – Centro Regional Veraguas.

## II. ANTECEDENTES

A continuación, se detallarán diferentes aspectos que contribuirán a tener una mayor comprensión sobre el tema de investigación:

### A. Contaminación de aire y sus consecuencias

La contaminación del aire se refiere a la presencia de sustancias dañinas en la atmósfera, que pueden tener efectos adversos en la salud humana, el medio ambiente y los ecosistemas [2]. Estas sustancias, conocidas como contaminantes atmosféricos, pueden ser de origen natural o provocadas por actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la industria, el transporte y la agricultura. Los contaminantes atmosféricos [5] más comunes incluyen partículas sólidas en suspensión (PM10 y PM2.5), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV), ozono (O<sub>3</sub>) y monóxido de carbono (CO). La calidad del aire puede ser medida por la presencia de estos contaminantes, tal como se muestra en la Figura 2.

Estos contaminantes pueden tener diversas consecuencias en la salud, como enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer, así como impactos negativos en los ecosistemas, la calidad del agua y el cambio climático [3].

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O <sub>3</sub> 8h ppm	O <sub>3</sub> 1h Ppm (1)	PM <sub>10</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>2.5</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	CO 8h ppm	SO <sub>2</sub> 24h ppm	NO <sub>2</sub> 1h ppm
0-50	Verde	Buena	0,000 0,059	-	0 54	0,0 15,4	0,0 4,4	0,000 0,034	(2)
51-100	Amarillo	Moderada	0,060 0,075	-	55 154	15,5 40,4	4,5 9,4	0,035 0,144	(2)
101-150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 0,095	0,125 0,164	155 254	40,5 65,4	9,5 12,4	0,145 0,224	(2)
151-200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 0,115 0,116	0,165 0,204	255 354	65,5 150,4	12,5 15,4	0,225 0,304	(2)
201-300	Púrpura	Muy Dañina a la salud	0,374 (0,155 0,404) (4)	0,205 0,404	355 424	150,5 250,4	15,5 30,4	0,305 0,604	0,65 1,24
301-400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 0,504	425 504	250,5 350,4	30,5 40,4	0,605 0,804	1,25 1,64
401-500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 0,604	505 604	350,5 500,4	40,5 50,4	0,805 1,004	1,65 2,04

Figura 2: Criterio del índice de calidad del aire (ICA) [4].

La monitorización de la calidad del aire es fundamental para evaluar los niveles de contaminantes y tomar medidas adecuadas para reducir su impacto. La detección temprana y precisa de la contaminación del aire permite proteger la salud de los individuos expuestos y el entorno circundante.

### B. Algoritmos de inteligencia artificial y sensores

Los algoritmos de inteligencia artificial ofrecen la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos de forma eficiente. Se basan en técnicas como el aprendizaje automático que permiten a los sistemas de monitoreo de la calidad del aire aprender y adaptarse a partir de los datos recopilados [5].

En este trabajo se hace uso del algoritmo Random Forest [6], el cual se basa en técnicas de Árboles de Decisión, el cual es altamente beneficioso en el monitoreo de la calidad del aire en entornos industriales. Su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y realizar predicciones precisas permite analizar la complejidad de los datos ambientales y detectar patrones sutiles. La característica principal de este algoritmo es su habilidad para generar múltiples árboles de decisión independientes y combinar sus resultados mediante la premediación de las predicciones individuales, evitando así el sobreajuste del modelo [7].

Los dispositivos sensores constituyen herramientas fundamentales empleadas para la medición de diversas variables físicas o químicas en el entorno. En el ámbito del monitoreo de la calidad del aire, dichos sensores desempeñan un papel crucial al detectar y cuantificar la presencia de contaminantes atmosféricos, tales como partículas, gases y compuestos orgánicos volátiles.

Los avances significativos en la tecnología de sensores han propiciado la creación de dispositivos más compactos, precisos y económicamente eficientes. Estos desarrollos han facilitado su integración en redes de monitoreo distribuidas. Los sensores inteligentes de última generación recopilan datos en tiempo real, transmitiéndolos a sistemas centrales para su posterior procesamiento y análisis. Este enfoque posibilita la obtención de una visión detallada y actualizada de la calidad del aire en entornos específicos, contribuyendo así a una comprensión más completa y precisa de la situación ambiental.

### C. Trabajos previos

En Panamá, se ha desarrollado proyectos que utilizan IoT y sensores ambientales para medir en tiempo real la calidad del aire en exteriores. Estos sistemas monitorean niveles de ozono, partículas suspendidas en el aire, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros contaminantes [8]. De igual manera el IoT por su practicidad en la transmisión de datos se ha utilizado como

medio para la medición de la contaminación del aire en exteriores, usando sensores colocados en un automóvil [9]. Los resultados obtenidos demuestran las capacidades de las técnicas de IoT para una transmisión segura, efectiva y en tiempo real de la información.

La utilización de técnicas de Inteligencia Artificial ha sido estudiada mediante un modelo basado en redes neuronales de tipo UConvLSTM que permite extraer las características espaciales y temporales para realizar predicciones de la concentración de PM<sub>2.5</sub> en exteriores. El modelo tiene la capacidad de realizar predicciones eliminando la influencia de factores antropológicos y meteorológicos [10].

La inteligencia artificial se ha convertido en una aliada para el análisis de diferentes temas relacionados a la calidad del aire, como se puede mostrar en el trabajo [11]. El cual muestra una revisión del estado del arte en la aplicación de estas técnicas al análisis del aire. El estudio indica que entre las técnicas más utilizadas se pueden citar LSTM (Long Short-Term Memory) [12], RF (Random Forest) [13] y SVR (Support Vector Regression). Estas técnicas se han aplicado en la medición de contaminantes como lo son partículas en suspensión (PM por sus siglas en inglés), Óxidos Nitroso NO<sub>x</sub>, Monóxido de Carbono (CO) y Ozono (O<sub>3</sub>). En el estudio se mencionan también gran cantidad de enfoques dirigidos al estudio de la calidad de aire en interiores, donde la versatilidad del Aprendizaje Automático ha permitido la obtención de buenos resultados.

Finalmente, tenemos el trabajo realizado en [14] donde se revisan dispositivos de bajo costo para monitorear la calidad del aire, señalando brechas, como la falta de especificaciones en la fiabilidad y calibración de sensores. De los 35 proyectos evaluados, la mayoría mide temperatura, humedad y CO<sub>2</sub>, con baja inclusión de sensores de partículas PM. En contraste, el estudio utiliza el PMS7003 de Plantower Technology que evalúa PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1.0</sub>. La evaluación de un sensor GP2Y1010AU0F de SHARP muestra falta de estabilidad, prefiriendo el PMS3003. Respecto al almacenamiento, la mayoría opta por la nube, mientras el proyecto implementa Docker y MongoDB para versatilidad operativa.

### III. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolla en el marco de una investigación aplicada, con un alcance descriptivo, dado que se plantea un problema real y una posible solución, presentando un diseño del sistema y las tecnologías necesarias para la construcción de este. A continuación, se plantean las etapas del trabajo de investigación realizado:

#### A. Identificación del problema

En la actualidad, las industrias ubicadas en Santiago de Veraguas enfrentan una carencia de un sistema de

monitoreo que les permita evaluar la calidad del aire en sus entornos industriales, lo que potencialmente puede dar lugar a exposiciones prolongadas a contaminantes atmosféricos. Ante esta situación, se llevó a cabo un proceso de lluvia de ideas para abordar el problema, resultando en dos posibles soluciones: Una basada en sensores ambientales y Arduino, y otra que incorpora algoritmos de inteligencia artificial junto con los mismos sensores ambientales. Tomando como mejor opción la utilización de algoritmos de inteligencia artificial supervisados para la monitorización y medición de la calidad del aire.

#### B. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica relacionada al proyecto planteado a través de artículos, revistas científicas, repositorios digitales y a través de sitios web como Google Scholar, Scielo, entre otras.

#### C. Diseño del sistema

Para el diseño, se plantea un modelo el cual contiene diferentes componentes de hardware y software, y la interacción que hay entre ellos.

#### D. Resultado

En la última etapa se presentan los resultados obtenidos de la construcción y prueba del Prototipo de un sistema de monitoreo inteligente para la medición de la calidad del aire en entornos industriales.

#### E. Tecnologías y Herramientas

- Orange Pi 5: Es una computadora de placa única (SBC) potente y versátil octa-core que realizará la función de servidor central del sistema.
- ESP32: es un sistema integrado en un chip (SoC) de bajo costo y bajo consumo con Wi-Fi integrado y Bluetooth de modo dual [14].
- Docker: es una plataforma abierta para desarrollar, distribuir y ejecutar aplicaciones. Docker le permite separar sus aplicaciones de su infraestructura para que pueda entregar software rápidamente. Con Docker, puede gestionar su infraestructura de la misma forma que gestiona sus aplicaciones. Al aprovechar las metodologías de Docker para enviar, probar y desplegar código rápidamente, puede reducir significativamente el tiempo que transcurre entre la escritura del código y su ejecución en producción [15].

- MongoDB: es un sistema de administración de bases de datos orientado a documentos que almacena grandes cantidades de datos a lo que es necesario acceder y consultar fácilmente.
- Grafana: es una aplicación web de análisis y visualización interactiva de código abierto.
- Python: Python es un lenguaje de programación flexible y diseñado para ser fácil de leer. Es orientado a objetos y de alto nivel.
- MicroPython: Es una implementación sencilla y eficiente del lenguaje Python3 optimizado para ejecutarse en microcontroladores y entornos restringidos.
- Keras: es una biblioteca de algoritmos de inteligencia artificial de Código Abierto escrita en Python.
- Equipo de cómputo: Procesador octa-core 64-bit, 16GB de memoria RAM, tarjeta de video ARM Mali-G610.

#### IV. DISEÑO DEL SISTEMA PROPUESTO

A continuación, se despliega el diseño conceptual integral que da forma al prototipo:

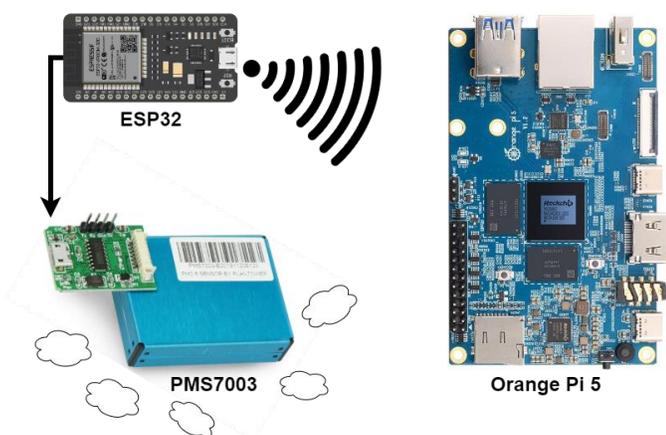


Figura 3: Diseño del sistema propuesto.

El propósito del sistema es crear un entorno de supervisión inteligente y remoto de la calidad del aire en entornos industriales en Santiago de Veraguas. En la Figura 3, se muestra el funcionamiento del prototipo, en donde se utilizará una implementación ligera en Grafana, lo que permitirá visualizar los datos a través de un panel gráfico. Para mejorar el valor del sistema, se han incorporado tecnologías que lo hacen compatible con múltiples plataformas. Esto se logra mediante el uso de contenedores, específicamente

contenedores Docker. En primer lugar, el sistema recopilará los datos del sensor de calidad del aire PMS7003. Posteriormente esta información se envía al microcontrolador ESP32 mediante conexiones UART. Una vez que el microcontrolador obtiene los datos, los envía al Orange Pi 5.

Esta placa utiliza un sistema operativo Linux que funciona como el servidor principal de nuestro sistema. Después de que el microcontrolador ESP32 envía los datos, son recibidos por la placa Orange Pi a través de una interfaz de comunicación, específicamente una REST API. Esta parte del sistema se conoce como backend.

El backend contiene toda la lógica para almacenar los datos recibidos en la base de datos no relacional MongoDB y también para realizar la clasificación del dato recibido, la clasificación se realiza utilizando el algoritmo Random Forest, el sistema cuenta con un modelo basado en reglas, el cual dará un resultado basándose en la tabla del índice de calidad del aire (Ver Figura 2). Luego de la clasificación el resultado es mostrado en tiempo real en el panel gráfico a través del servicio de Grafana. De igual manera en este panel se mostrarán toda la información almacenada en la base de datos de una manera gráfica. En la Figura 4, se presenta un diagrama de bloques representando el flujo del sistema anteriormente descrito.

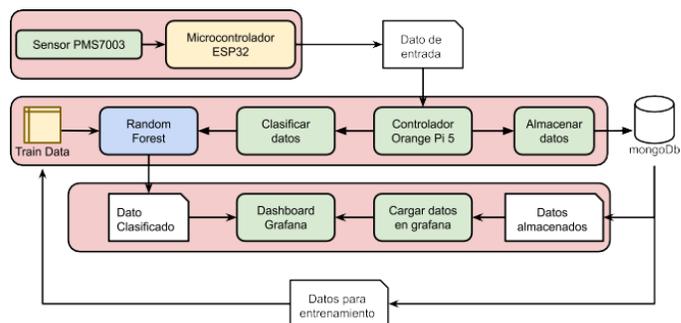


Figura 4: Diagrama de bloques representando el flujo del sistema.

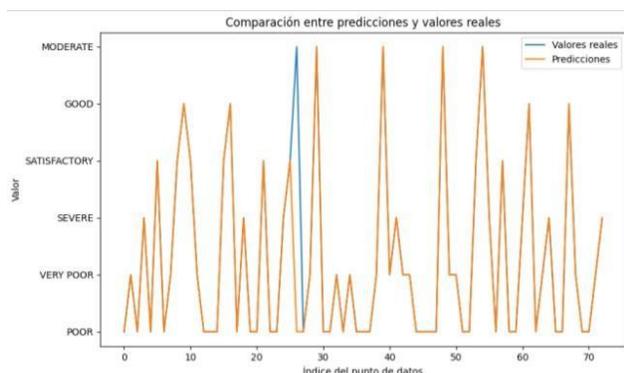
#### V. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la etapa inicial del proyecto:

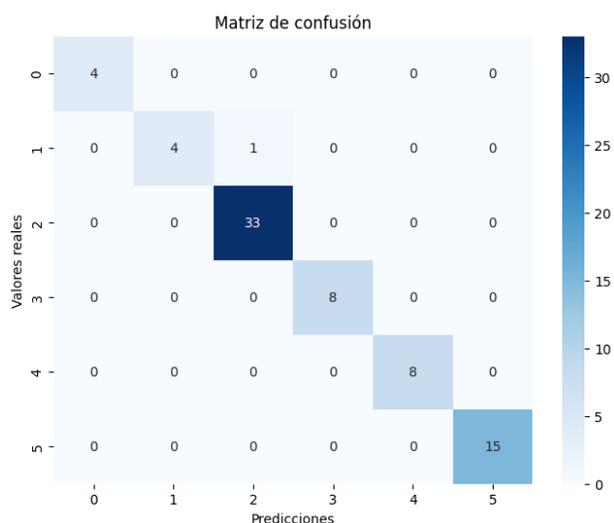
- Este proyecto busca contribuir al campo de la monitorización ambiental en entornos industriales, proporcionando una solución tecnológica innovadora y accesible para evaluar y mejorar la calidad del aire en naves industriales.
- Este proyecto presenta un sistema de monitorización

inteligente de la calidad del aire basado en sensores, los cuales recopilan datos de puntos específicos dentro de la nave industrial y utiliza algoritmos de inteligencia artificial para evaluar la calidad del aire.

- En la Figura 5 se pueden observar 70 lecturas de PM 2.5 reales vs la predicción del algoritmo de inteligencia artificial, dando como resultado, una precisión del 98%. Además, En la Figura 6 se puede observar una matriz de confusión, en donde podemos apreciar en la diagonal principal la precisión del algoritmo entre la predicción y los datos reales de prueba, dando nuevamente como resultado una precisión del 98%. Ya que solo se desvía en un cuadrante



**Figura 5:** Grafico comparativo de las predicciones del algoritmo de inteligencia artificial y los valores reales.



**Figura 6:** Matriz de confusión que representando la precisión del algoritmo de inteligencia artificial.

## VI. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos indican que el sistema tiene una precisión superior al 98% en la clasificación y predicción de la calidad del aire. Esta precisión es un indicador significativo de la eficacia del sistema en la detección de la contaminación y la evaluación de la calidad del aire en tiempo real.
- En el ámbito comercial, este proyecto tiene como objetivo presentarse a industrias interesadas en evaluar el prototipo, ofreciendo una herramienta que posibilite la detección temprana y precisa de la contaminación del aire garantizando ambientes laborales más saludables y seguros, así como facilitar el cumplimiento de normativas ambientales.
- En términos de impacto, esta herramienta tiene como objetivo brindar apoyo a las industrias en el monitoreo de la calidad del aire en sus instalaciones, lo que les permitirá implementar estrategias de control y mitigación eficientes. De esta manera, se protegerá la salud de las personas expuestas y el entorno circundante.
- En relación con la escalabilidad, se considera que el concepto del prototipo construido tiene el potencial de ser adaptado a otros tipos de entornos cerrados. Esto implica que la solución desarrollada puede ser ampliada y replicada en diversas configuraciones y contextos, lo que brinda la posibilidad de extender su aplicación a diferentes sectores industriales u otros espacios cerrados que requieran monitoreo de la calidad del aire.
- Es de relevancia destacar que el prototipo se encuentra actualmente en una fase de prueba inicial, lo que implica la necesidad de incorporar un mayor número de sensores para medir otros contaminantes y así ampliar la cantidad de parámetros analizados.
- En base al costo, la inversión en el prototipo para el monitoreo de la calidad del aire en entornos industriales es altamente justificada. Los beneficios en términos de salud, bienestar de los trabajadores y reputación como empresa innovadora hacen que esta solución sea estratégica y valiosa.
- Los posibles riesgos de comercialización incluyen dificultades para establecer una base de clientes sólida, retrasos en la adopción de las tecnologías, mala calibración de sensores y dificultad para adquirir componentes.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos sinceramente a la Universidad Tecnológica de Panamá - Centro Regional Veraguas por su invaluable apoyo, así como a los proyectos DDCCT N°073-2021 y DDCCT N°074-2021. Queremos expresar nuestro agradecimiento especial al Sistema Nacional de Investigación de Panamá (SNI) por respaldar a J.C.R y E.C. Su contribución ha sido fundamental para el éxito de nuestro trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] R. V. Corlan, R. M. Balogh, I. Ionel, and S. Kilyeny, 'The importance of indoor air quality (IAC) monitoring', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1781, no. 1, p. 012062, Feb. 2021.
- [2] I. Amable Álvarez, J. Méndez Martínez, B. M. Bello Rodríguez, B. Benítez Fuentes, L. M. Escobar Blanco, and R. Zamora Monzón, 'Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud', *Revista médica electrónica*, vol. 39, no. 5, pp. 1160–1170, 2017.
- [3] R. O’Ryan and L. Larraguibel, 'Contaminación del aire en Santiago: Estado actual y soluciones', *Centro de Economía Aplicada, Universidad de Chile*.
- [4] O. Cuesta Santos, A. Wallo Vázquez, A. Collazo Aranda y P. Castellanos Pentón. "Contaminación atmosférica en el municipio Regla: Aplicación del índice de calidad del aire (ICA)." *Revista Cubana de Meteorología*. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/308>
- [5] R. P. Díez, A. G. Gómez, and N. de Abajo Martínez, *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Universidad de Oviedo, 2001.
- [6] T. K. Ho, 'Random decision forests', in *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition*, 1995, vol. 1, pp. 278–282.
- [7] D. A. Gavilanes Proaño, 'Sistema de monitoreo apícola mediante el uso de redes neuronales artificiales para identificar la variación de población', *Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas ...*, 2020.
- [8] O. 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', *LACCEI, Inc.*, 2021.
- [9] J. Bobulski, S. Szymoniak, and K. Pasternak, 'An IoT System for Air Pollution Monitoring with Safe Data Transmission', *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 445, 2024.
- [10] Y. Zeng et al., 'Industrial Heat Source-Related PM2.5 Concentration Estimates and Analysis Using New Three-Stage Model in the Beijing--Tianjin--Hebei Region', *Atmosphere*, vol. 15, no. 1, p. 131, 2024.
- [11] I. Essamlali, H. Nhaila, and M. El Khaili, 'Supervised Machine Learning Approaches for Predicting Key Pollutants and for the Sustainable Enhancement of Urban Air Quality: A Systematic Review', *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 976, 2024.
- [12] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, 'Long short-term memory', *Neural computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780, 1997.
- [13] H. Chojer, P. Branco, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and S. I. V. Sousa, 'Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: Recent advancements', *Science of The Total Environment*, vol. 727, p. 138385, 2020.
- [14] Espressif Systems. "ESP32 Series - Datasheet". *Wireless SoCs, Software, Cloud and AIoT Solutions | Espressif Systems*. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
- [15] Docker Inc. "Get Docker". *Docker Documentation*. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/get-docker/>
- [16] L. Breiman, 'Random forests', *Machine learning*, vol. 45, pp. 5–32, 2001.