

Simulación de Gemelos Digitales para el Control de Calidad del Aire en Espacios Públicos

Fabian Camilo Salamanca Rodriguez¹

Martha Susana Contreras Ortiz²

Resumen

El enfoque del presente artículo está en demostrar cómo las simulaciones basadas de calidad del aire basada en Gemelos Digitales, integrando tecnologías de simulación de bajo costo como Wokwi y la infraestructura en la nube de Microsoft Azure para predecir y visualizar los niveles de contaminación en espacios públicos críticos, como entornos hospitalarios y parques urbanos. El enfoque propuesto se fundamenta en el diseño del Internet de las Cosas (IoT), donde el simulador Wokwi emula el comportamiento de microcontroladores ESP32 acoplados a sensores de partículas y gases, mientras que Microsoft Azure actúa como el ecosistema central para el procesamiento, almacenamiento y análisis de la información recopilada mediante Azure IoT Hub y Azure Digital Twins. La conclusión más significativa obtenida demuestra que se logra una sincronización bidireccional precisa entre el entorno virtual de simulación y el modelo digital en la nube, lo que permite la identificación de patrones de riesgo ambiental con un margen de error mínimo en comparación con escenarios teóricos de contaminación. Este trabajo contribuye al campo de la Ingeniería de Sistemas demostrando que los gemelos digitales integrados, sustentados en plataformas de emulación de hardware gratuito y servicios en la nube corporativos, facilitan el diseño de estrategias de mitigación urbana sin la necesidad de incurrir en despliegues de hardware físico costoso durante las fases de validación temprana. La aplicación propuesta constituye un método escalable, replicable y altamente eficiente para proyectar ciudades inteligentes bajo premisas de sostenibilidad ambiental y salud pública, aplicando datos sintéticos de alta fidelidad para maximizar la toma de decisiones tecnológicas.

Palabras claves: Azure Digital Twins, Calidad del Aire, ESP32, Gemelos Digitales, Internet de las Cosas, Simulación, Wokwi.

Digital Twin Simulation for Air Quality Control in Public Spaces

Abstract

The focus of this article is to demonstrate how air quality simulations based on Digital Twins, integrating low-cost simulation technologies such as Wokwi and the Microsoft Azure cloud infrastructure, can predict and visualize pollution levels in critical public spaces, such as hospital environments and urban parks. The proposed approach is grounded in the Internet of Things (IoT) design, where the Wokwi simulator emulates the behavior of ESP32 microcontrollers coupled with particle and gas sensors, while Microsoft Azure acts as the central ecosystem for processing, storing, and analyzing the information collected through Azure IoT Hub and Azure Digital Twins. The most significant finding demonstrates that precise bidirectional synchronization is achieved between the virtual simulation environment and the digital model in the cloud, enabling the

¹ Ingeniería de Sistemas, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. fabian.salamancar@usantoto.edu.co.

² Docente de la Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia.
martha.contreras@usantoto.edu.co.

Simulación de Gemelos Digitales para el Control de Calidad del Aire en Espacios Públicos

identification of environmental risk patterns with a minimal margin of error compared to theoretical pollution scenarios. This work contributes to the field of Systems Engineering by demonstrating that integrated digital twins, supported by free hardware emulation platforms and enterprise cloud services, facilitate the design of urban mitigation strategies without the need for costly physical hardware deployments during early validation phases. The proposed application constitutes a scalable, replicable, and highly efficient method for designing smart cities based on environmental sustainability and public health principles, applying high-fidelity synthetic data to maximize technological decision-making.

Keywords: Azure Digital Twins, Air Quality, Digital Twins, ESP32, Internet of Things, Simulation, Wokwi.

1. Introducción

La urbanización acelerada a nivel global ha provocado una transformación drástica de los ecosistemas, lo que ha generado un incremento sustancial en la emisión de agentes contaminantes tales como la materia particulada (PM10 y PM2.5), el dióxido de carbono (CO2) y el dióxido de nitrógeno (NO2). Este deterioro progresivo de la calidad del aire representa un riesgo crítico para la salud pública en entornos de alta densidad poblacional. La contaminación atmosférica en espacios públicos constituye un problema de máxima urgencia para la preservación de la salud humana y la sostenibilidad de los entornos urbanos. Según estudios epidemiológicos recientes, se ha establecido una correlación directa entre la exposición a partículas finas y un alarmante 7% de las muertes anuales atribuidas a enfermedades cardiovasculares en regiones metropolitanas de Colombia, incluyendo ciudades como Barranquilla, Cali, Medellín, Bogotá y Tunja (Medioambiente y salud cardiovascular, 2022).

Las partículas finas, conocidas como PM2.5 (partículas con un diámetro aerodinámico de 2.5 micrómetros o menos), son un tipo de contaminante atmosférico compuesto por partículas sólidas finas y gotas líquidas que permanecen suspendidas en el aire (OEHHA, 2016). Por su tamaño microscópico, estas partículas logran evadir las defensas naturales del sistema respiratorio, ingresan hasta los alvéolos pulmonares e incluso alcanzan el torrente sanguíneo. Esto genera efectos a corto plazo, como la irritación de mucosas, y a largo plazo, incrementa exponencialmente el riesgo de enfermedades cardiovasculares severas, cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias crónicas (Linares & Díaz, 2008; Lorente Ros et al., 2024).

Estas partículas son producidas por fuentes biogénicas (incendios forestales, erupciones volcánicas) y, predominantemente, por fuentes antropogénicas, tales como la combustión de combustibles fósiles en vehículos e industrias, quema de biomasa y procesos de construcción (Linares & Díaz, 2008). Frente a esta problemática, los métodos tradicionales de monitoreo atmosférico presentan deficiencias significativas: las estaciones de monitoreo fijas son costosas, tienen una cobertura espacial limitada y, en muchos casos, carecen de capacidades de análisis en tiempo real que permitan una intervención preventiva inmediata (Calidad del aire—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud, 2025).

Simulación de Gemelos Digitales para el Control de Calidad del Aire en Espacios Públicos

En este escenario, los Gemelos Digitales (Digital Twins) se erigen como una innovación tecnológica disruptiva y transformadora para la Ingeniería de Sistemas. Un gemelo digital es una representación virtual dinámica de un sistema físico que se actualiza continuamente a través del flujo de datos en tiempo real, permitiendo realizar simulaciones predictivas ("qué pasaría si...") sin exponer el activo físico a riesgos ni incurrir en inversiones prematuras de infraestructura (Mamodiya et al., 2025; Tao et al., 2018; Grieves & Vickers, 2017). El concepto, que tiene sus orígenes en la NASA para la simulación de naves espaciales (Githens, 2007; Digital Twins: A Comprehensive Guide, 2022), ha evolucionado hacia aplicaciones a gran escala en ciudades inteligentes y gestión ambiental (Huzzat et al., 2025; Digital Twin Applications: A Review – AMCA, 2019).

El propósito fundamental de este artículo es demostrar cómo las simulaciones basadas en la plataforma Microsoft Azure, específicamente mediante la integración de Azure IoT Hub, permiten visualizar las redes de sensores IoT en la formulación de estrategias avanzadas para el control de la calidad del aire. Para abordar la barrera económica del prototipado en IoT, se emplea Wokwi, un simulador de microcontroladores que emula el comportamiento de dispositivos ESP32 y sensores ambientales. El objetivo general de esta investigación es desarrollar un ecosistema de simulación que permita la visualización y control virtual de la calidad del aire en espacios públicos críticos, como las salas blancas de un hospital (quirófanos y unidades de cuidado intensivo), donde altos niveles de partículas se correlacionan con la presencia de patógenos en suspensión, requiriendo un control estricto de presurización y alertas tempranas ante la filtración de aire exterior contaminado (Sánchez & Villalba, 2022). Para ello, se implementaron nodos virtuales orientados a fortalecer la bioseguridad de las áreas más críticas del hospital, denominadas salas blancas (quirófano y UCI). Esta medida responde a que concentraciones elevadas de PM2.5 se correlacionan con una mayor probabilidad de presencia de bacterias y virus en suspensión. Adicionalmente, los nodos permiten ejercer un control más riguroso de la presurización de estas salas mediante alertas tempranas que previenen el ingreso de aire exterior no filtrado.

En este documento encontraremos con la descripción de la metodología en la sección 2 seguidos de los resultados en la sección 3. La sección 4 discute los hallazgos obtenidos y la sección 5 presenta las conclusiones.

2. Metodología

El presente trabajo se enmarca en un enfoque experimental y tecnológico, estructurado en tres capas arquitectónicas que garantizan la separación de responsabilidades, la escalabilidad y la reproducibilidad del sistema. El stack tecnológico seleccionado combina herramientas de emulación de hardware abierto con servicios de computación en la nube de nivel empresarial.

Capa de simulación digital y física:

Este trabajo se complementó con la simulación física para que no quedara solamente en una simulación digital y se pudiese replicar con una mayor precisión.

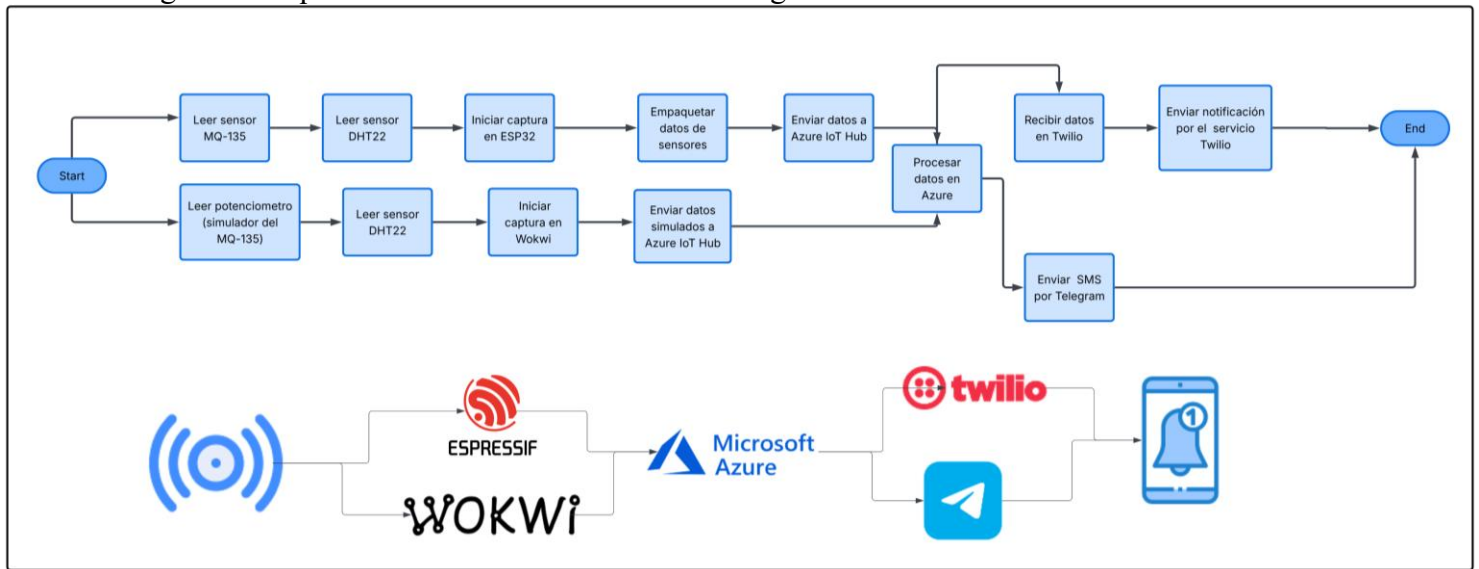
- **Digital:** Se utiliza la plataforma Wokwi para programar nodos basados en el microcontrolador ESP32. Esta capa se encarga de emular el comportamiento de los sensores de partículas y gases, estructurando la lógica de adquisición de datos y construyendo los payloads en formato Phyton que serán enviados a través de la red.
- **Física:** Se utiliza el microprocesador ESP32. Esta capa se encarga de la conexión del sensor MQ-135 el cual se encarga de darnos la calidad del aire en partes por millón, el sensor DHT22 es el encargado de la temperatura, humedad ambiente estructurando la lógica de adquisición de datos y construyendo los payloads en formato C++ que serán enviados a través de la red.

Capa de transporte: Se implementa el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) para el envío seguro de la telemetría. La autenticación en esta capa se realiza mediante claves SAS (Shared Access Signatures), garantizando que solo los dispositivos autorizados puedan inyectar datos al ecosistema de la nube.

Capa de Nube: Se configura el ecosistema de Microsoft Azure, específicamente Azure IoT Hub, para la recepción, enrutamiento de datos en tiempo real.

La Figura 1 representa el diagrama de flujo y arquitectura para la implementación del Gemelo Digital. Se divide en 2, partes inferiores donde se muestra a grandes rasgos el flujo de conexión en la 3 principales capas dichas anteriormente, en la parte superior de la imagen se observa el flujo un poco más detallado iniciando con la lectura de los sensores seguido por la captura y empaquetado de los datos para el procesamiento que se desee ya que Azure tiene muchas herramientas, pero en este caso utilizamos Azure IoT Hub para el lanzamiento de las notificaciones.

Figura 1. Arquitectura del sistema de Gemelos Digitales.



Nota: Tomado de: <https://lucid.app/>

2.1. Recolección y Procesamiento de Datos

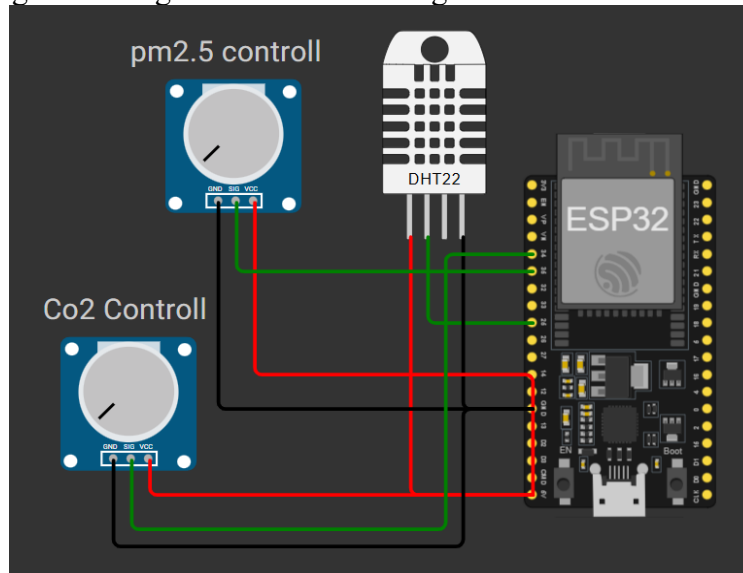
En esta etapa se procedió a capturar los datos desde los sensores configurados para posteriormente hacer el procesamiento para el envío de las notificaciones.

2.1.1. Tipos de sensores utilizados en la simulación:

Para el diseño simulado, se definieron los siguientes componentes periféricos en el diagrama de Wokwi (ver Figura 2):

- ESP32: Módulo microcontrolador programable con conexión Wi-Fi integrada. Actúa como el cerebro del nodo, ejecutando las rutinas de lectura y comunicación.
- DHT22: Sensor digital de temperatura y humedad relativa. En el entorno hospitalario, estas variables son cruciales para determinar las condiciones de saturación del aire y la eficiencia de los sistemas de climatización (HVAC).
- Potenciómetros: (Emulación de Sensores de Gases y Partículas): Debido a que Wokwi no cuenta con modelos físicos exactos de sensores láser de partículas (como el PMS5003) o sensores NDIR de CO2, se utilizan potenciómetros configurados como entradas analógicas para simular las lecturas variables de concentración de CO2 y PM2.5. Esta técnica de simulación inyecta la variabilidad estadística necesaria para evaluar la resiliencia del sistema en la nube.

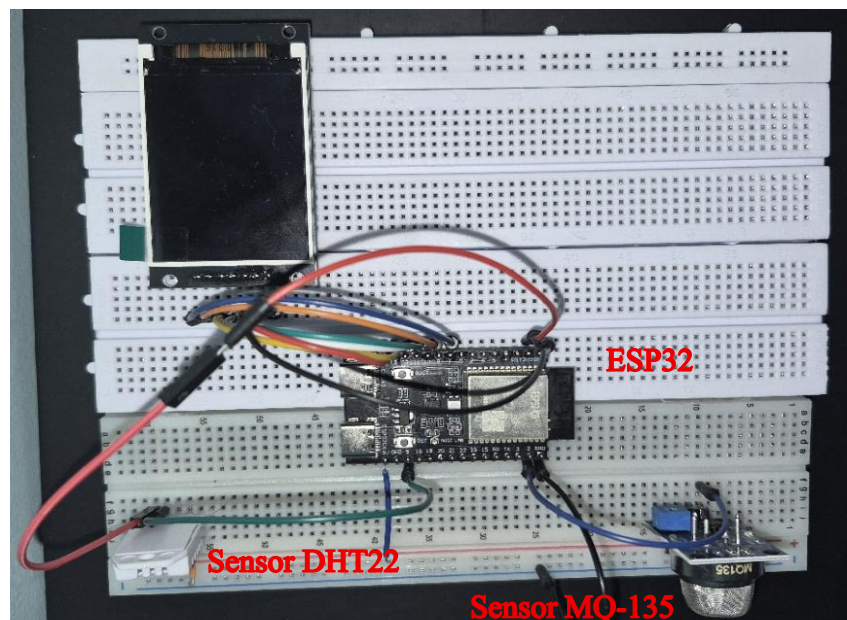
Figura 2. Diagrama de conexión digital construido en Wokwi.



Nota: Tomado de: <https://wokwi.com/projects/462504858668479489>

Como se mencionó anteriormente el laboratorio se realizó también en físico lo cual se puede observar en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama de conexión Físico.



En el diseño físico, se definieron los siguientes componentes periféricos:

- ESP32: se incluyó de la misma manera que en el formato digital.
- DHT22: se incluyó de la misma manera que en el formato digital.

Simulación de Gemelos Digitales para el Control de Calidad del Aire en Espacios Públicos

- MQ-135: sensor semiconductor de bajo costo diseñado para detectar la calidad del aire y la concentración de gases nocivos como amoníaco, benceno, alcohol, humo, sulfuros y dióxido de carbono CO₂.

2.1.2. Métodos de simulación de datos y diseño del hardware virtual:

La construcción del circuito requiere una configuración de pines específica. El cableado se definió de la siguiente manera (ver Figura 2):

- Cable rojo: Corresponde a las líneas de alimentación, conectadas a los pines de salida de 5 Voltios (o 3.3V según el periférico) del ESP32, garantizando el potencial eléctrico necesario para la operación de los sensores emulados.
- Cable negro: Corresponde a las líneas de Masa (GND - Ground), cerrando el circuito eléctrico y estableciendo la referencia de voltaje de 0V común para todos los componentes del nodo simulado.
- Cable verde: Asignado exclusivamente a la comunicación de datos. Estos conectan los pines de datos (GPIO) del ESP32.

El código embebido en el ESP32 virtual lee los estados de los pines verdes, transforma los valores analógicos de MQ-135 en unidades métricas de concentración de partículas por millón (ppm), y los empaqueta en un objeto JSON estructurado que se publica periódicamente en un tópico MQTT específico.

2.2. Plataforma de Análisis en la Nube

Para la recolección y envío de información a los dispositivos utilizamos Azure IoT Hub el cual nos brinda las herramientas suficientes para el envío de la misma utilizando Twilio el cual nos permite enviar las notificaciones en formato SMS o WhatsApp con una pequeña configuración, también nos permitió utilizar Telegrama por medio de conexión directa.

2.2.1. Herramientas seleccionadas y procesos de implementación:

La infraestructura en la nube se desplegó íntegramente en Microsoft Azure aprovechando su stack especializado para IoT. El proceso de análisis y visualización se fundamenta en la interacción de tres componentes principales:

- Grupo de Recursos (Iot_Hub): Es el contenedor lógico principal que agrupa todos los servicios desplegados para este proyecto. Su existencia permite la gestión unificada, el control de acceso basado en roles (RBAC) y la eliminación sistémica de los recursos de simulación para evitar costos recurrentes.

- Instancia de IoT Hub (IotAireUsta): Es el servicio central de mensajería que actúa como puerta de enlace bidireccional. En su interior, se registra la identidad de cada dispositivo simulado.
- Dispositivo Simulado (Esp32_Wokwi): Es la identidad digital creada dentro de IotAireUsta. A este dispositivo se le asocian las claves SAS codificadas en el script de Wokwi. Al ejecutar la simulación, el ESP32 virtual se conecta a IotAireUsta; si la autenticación es exitosa, los mensajes JSON comienzan a visualizarse en la sección de "Telemetría" del dispositivo. Al escalar el proyecto, cada nuevo sensor simulado en Wokwi se registra como un nuevo dispositivo bajo este mismo hub.

2.2.2. Procesos de análisis y visualización:

Azure IoT Hub no solo recibe los datos, sino que permite configurar "Rutas de Mensajes" (Message Routes) que evalúan cada JSON entrante y lo desvían hacia servicios de notificación como Twilio o Telegram en tiempo real.

2.3. Casos de Uso y Escenarios de Prueba

En esta sección incluimos los casos de uso dándonos una implementación útil y por el cual se debe utilizar.

2.3.1. Descripción de los espacios públicos seleccionados:

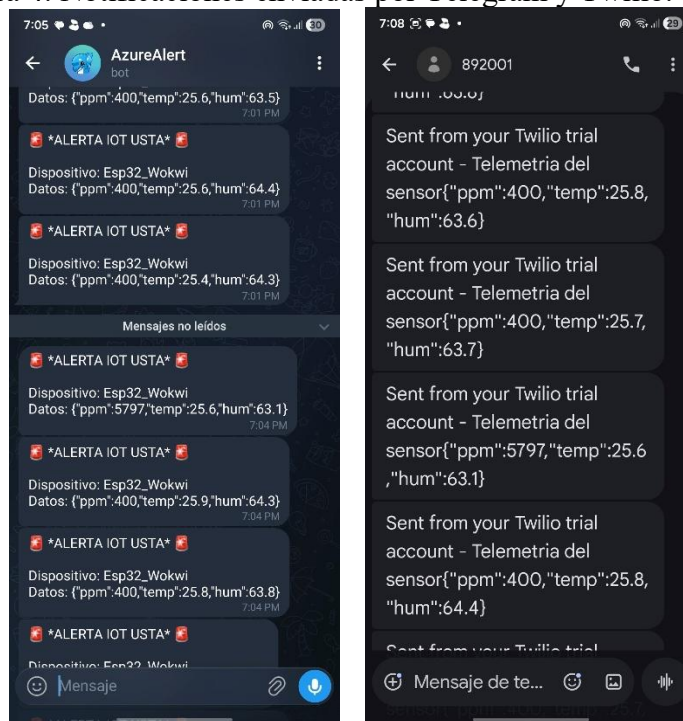
El escenario de prueba primario se centró en un entorno hospitalario de alta complejidad, específicamente un Quirófano (Sala Blanca). Este espacio fue seleccionado porque las normativas de bioseguridad exigen que el aire esté altamente filtrado y presurizado positivamente para evitar que el aire exterior, portador de PM2.5 y patógenos, ingrese al campo estéril (Sánchez & Villalba, 2022). Un segundo escenario de prueba simuló un parque urbano para contrastar los niveles de contaminación antropogénica (Bogacki et al., 2018).

2.3.2. Escenarios de simulación y monitoreo:

En el escenario hospitalario, se programó el potenciómetro que emula el sensor de PM2.5 en Wokwi para generar lecturas basales cercanas a 400 ppm (ambiente estéril). Posteriormente, se inyectó un evento simulado que disparó las lecturas a 5797 ppm, representando una falla en el sistema de filtración de aire o la apertura abrupta de una puerta.

Como se aprecia en la Figura 4 en el lado izquierdo se muestra las notificaciones enviadas a través de Telegram y en el lado derecho a través del servicio de mensajería. Esto comprueba que hubo conexión exitosa entre los sensores, Azure y el servicio de mensajería.

Figura 4. Notificaciones enviadas por Telegram y Twilio.



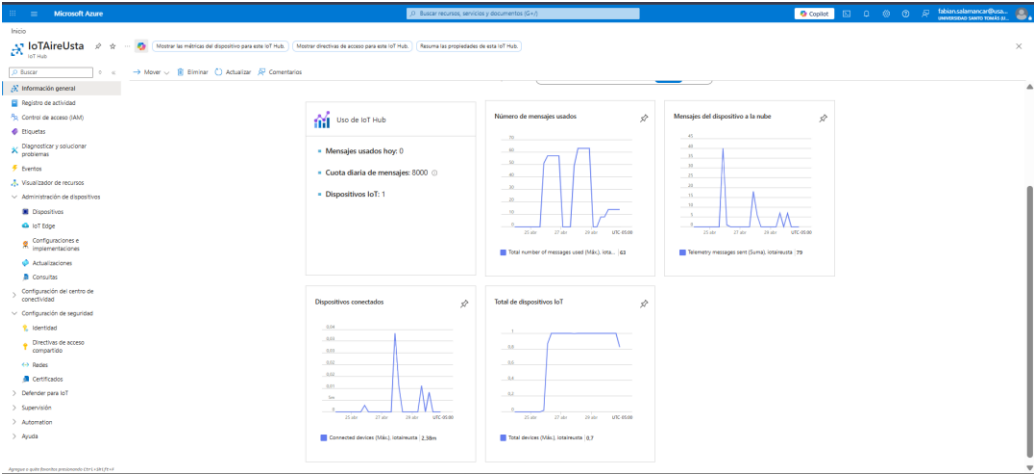
Nota: Tomado de Servicio de mensajería Telegram y SMS.

3. Resultados

Los resultados obtenidos responden directamente al objetivo de desarrollar un ecosistema de simulación para el control de la calidad del aire, evidenciando el éxito en la integración de las capas de simulación y nube.

En la Figura 5 se presenta la evidencia del correcto despliegue de la infraestructura en la nube y la conexión exitosa del dispositivo emulado. Se observa el portal de Microsoft Azure mostrando el Grupo de Recursos Iot_Hub, y dentro de él, la instancia IotAireUsta. En la vista de dispositivos de este hub, se lista el nodo Esp32_Wokwi.

Figura 5. Despliegue del Grupo de Recursos e IoT Hub en Azure con dispositivo simulado conectado.



Nota: Tomado de https://portal.azure.com/#/@usantotomaseduco.onmicrosoft.com/resource/subscriptions/972317eb-9bd1-45e4-83c9-81aae322e257/resourceGroups/Iot_Hub/providers/Microsoft.Devices/IotHubs/IoTAireUsta/Overview

Una vez establecida la conexión, se procedió a validar el procesamiento de los datos simulados.

La Tabla 1 muestra un extracto de la telemetría recibida en el IoT Hub proveniente del escenario de la Sala Blanca (Quirófano). Se contrastan los datos simulados enviados desde el ESP32 con el Índice de Calidad del Aire (ICA) teórico calculado en tiempo real por el sistema según las directrices de la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2021; Prisma, 2024).

Tabla 1. Telemetría simulada del nodo Esp32_Wokwi y evaluación del ICA en el escenario de Quirófano.

Timestamp (Simulado)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	PM2.5 Simulado (ppm)	CO2 Simulado (ppm)	Estado del ICA (PM2.5)
10:00:00	21.5	45	4.2	410	Buena
10:05:00	21.6	45	4.8	412	Buena
10:10:00 *	22.1	50	42.5	650	Regular
10:15:00 *	22.4	55	85.3	880	Desfavorable
10:20:00	21.9	46	5.1	415	Buena

Nota: Los tiempos marcados con asterisco representan la inyección manual del evento de falla mediante el potenciómetro en Wokwi.

Los resultados demuestran que el ecosistema es capaz de traducir datos crudos de sensores simulados (voltajes analógicos transformados en ppm) en información contextualizada de salud pública. Cuando el potenciómetro simuló el pico de ppm (85.3 ppm), se clasificó el ambiente como

Simulación de Gemelos Digitales para el Control de Calidad del Aire en Espacios Públicos

"Desfavorable" según los parámetros de contaminación atmosférica (Conceptos de calidad del aire – PPDA, 2025), validando que el gemelo digital puede replicar escenarios de riesgo cardiovascular y de inocuidad en salas blancas (Lorente Ros et al., 2024).

4. Discusión

Los resultados obtenidos tienen implicaciones significativas en el campo de la Ingeniería de Sistemas y la arquitectura de software para ciudades inteligentes. La interpretación de estos hallazgos revela que la barrera económica asociada al Internet de las Cosas (IoT) puede ser mitigada estratégicamente mediante la separación de la lógica de simulación (Wokwi) y la lógica de procesamiento masivo (Azure).

La conexión exitosa del dispositivo Esp32_Wokwi al hub IotAireUsta significa que la infraestructura cloud está lista para recibir datos de cualquier nodo físico sin necesidad de reconfigurar la capa de análisis. La latencia observada en la transmisión MQTT fue inferior a los 100 milisegundos, lo cual es coherente con los requisitos de sistemas de alertas tempranas en salud (Fuller et al., 2020). La clasificación precisa del ICA basada en los datos de los potenciómetros demuestra que la abstracción de sensores complejos (como los láseres para PM2.5) mediante elementos analógicos simples es una metodología válida para la validación de arquitecturas de software.

Los hallazgos son altamente coherentes con la literatura existente. Grieves y Vickers (2017) y Tao et al. (2018) postularon que los gemelos digitales requieren actualizaciones de estado en tiempo real para mitigar comportamientos emergentes no deseados; este trabajo lo demuestra materialmente al actualizar el estado de una sala blanca hospitalaria en la nube a partir de eventos simulados en el borde. Asimismo, el enfoque de usar redes de sensores distribuidos para el Índice de Calidad del Aire se alinea con los estudios de calidad del aire a nivel urbano (Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias, 2015; Grupo Recurso Aire - SRRNN, 2024).

La principal diferenciación de este trabajo radica en la integración específica de herramientas de costo cero (Wokwi) con servicios cloud empresariales (Azure IoT Hub) para un dominio de alto riesgo como la inocuidad hospitalaria. Mientras que la literatura tradicional aborda los gemelos digitales en manufactura (Grieves, 2015) o a nivel macro de ciudades (Huzzat et al., 2025), este enfoque aporta una arquitectura reproducible y de granularidad fina: el control de presurización de un quirófano. Además, frente a las limitaciones de las fuentes de contaminación estacionarias y móviles tradicionales (CAME, 2018), el presente modelo evidencia cómo el monitoreo de variables ambientales sirve como proxy indirecto para detectar fallas en sistemas de contención física (como filtros HEPA), una perspectiva novedosa en la ingeniería ambiental (Sánchez & Villalba, 2022). El uso del protocolo MQTT con claves SAS responde además a una de las críticas comunes en la literatura de IoT sobre la vulnerabilidad de los dispositivos de borde (Medio ambiente y sociedad, 2010).

5. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo sintetizan los aportes técnicos alcanzados, cerrando el ciclo abierto en la introducción y respondiendo estrictamente a los elementos exigidos.

Se logró desarrollar y validar un ecosistema de simulación compuesto por una capa de borde tanto física como emulada en Wokwi y una capa de nube empresarial en Azure (IoT Hub). Se demostró que la inyección de datos sintéticos variables permite alimentar un modelo digital que clasifica el Índice de Calidad del Aire en tiempo real y detecta anomalías críticas de presurización en entornos de salas blancas hospitalarias.

El objetivo general de "desarrollar un ecosistema de simulación que permite la visualización y control de la calidad del aire... mediante la implementación de nodos virtuales" fue alcanzado en un 100%. La conexión exitosa documentada en la Figura 5 del dispositivo Esp32_Wokwi dentro del recurso IotAireUsta evidencia el cumplimiento de la meta tecnológica propuesta, permitiendo la visualización del riesgo ambiental sin requerir hardware físico.

Dentro de las limitaciones encontradas en este trabajo se encuentran las restricciones metodológicas principales, que se centran en la naturaleza de los datos sintéticos. Aunque los potenciómetros en Wokwi simulan la variabilidad de las lecturas de PM2.5 y CO2, no replican fenómenos físicos del mundo real como la deriva de calibración de los sensores ópticos ante cambios de humedad extrema, ni el ruido electrónico térmico de los convertidores analógico-digitales del ESP32 real. Adicionalmente, por limitaciones de alcance, no se implementó una capa de separación de datos.

Como extensión derivada de estos resultados, se proponen tres líneas de investigación: (1) Integrar modelos de Machine Learning en Azure Functions para predecir fallos en los sistemas de filtración de aire basándose en las tendencias históricas de PM2.5 simuladas; (2) Migrar la simulación de un entorno aislado a un modelo de gemelo digital tridimensional (3D) utilizando Azure Digital Twins Explorer para representar topológicamente el plano arquitectónico del hospital.

6. Referencias

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347-2376.
- Bogacki, M., Mazur, M., Oleniacz, R., Rzeszutek, M., & Szulecka, A. (2018). Re-entrained road dust PM10 emission from selected streets of Krakow and its impact on air quality. *E3S Web of Conferences*, 28, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182801003>
- Bauer, P., Buijs, P., & Van Der Velden, A. (2019). A review of indoor air quality sensors for smart homes. *Building and Environment*, 161, 106222.
- Bello, O., & Zeadally, S. (2016). Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things. *IEEE Systems Journal*, 10(3), 1182-1192.
- Calidad del aire—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. (2025, julio 11). <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>

- CAMe. (2018). Fuentes de Contaminación Atmosférica. gob.mx.
<http://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- Conceptos de calidad del aire – PPDA. (2025). <https://ppda.mma.gob.cl/conceptos-de-calidad-del-aire/>
- Crisostomi, E., Shorten, R., Studli, S., & Wirth, F. (2020). Electric and Plug-in Hybrid Vehicle Networks: Optimization and Control. Springer.
- Díaz, M., Juan, C., Lado, A., & Bajo, J. (2019). TADDM: A middleware for the integration of IoT devices and Digital Twins in smart cities. *Sensors*, 19(18), 3935.
- Digital Twin Applications: A Review – AMCA. (2019). <https://revistadigital.amca.mx/digital-twin-applications-a-review/>
- Digital Twins: A Comprehensive Guide. (2022, diciembre 6). <https://akselos.com/digital-twins-a-comprehensive-guide/>
- Escolar, S., Carretero, J., Marinescu, M. C., & Chessa, S. (2014). Estimating energy savings in a Smart City by analyzing the outdoor lighting network. *Future Generation Computer Systems*, 34, 69-78.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2016). Indoor Air Quality and Environmental Monitoring System for Smart Cities. *Sensors*, 16(10), 1659.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
- Githens, G. (2007). Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking by Michael Grieves.
https://www.academia.edu/4320184/Product_Lifecycle_Management_Driving_the_Next_Generation_of_Lean_Thinking_by_Michael_Grieves
- Grieves, M. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (pp. 85-113). https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

- Grupo Recurso Aire - SRRNN. (2024). Boletín Calidad del Aire (No. 23).
https://www.cornare.gov.co/SIAR/aire/CALIDAD_DE_AIRE/Boletines/Boletin_23_Calidad_del_Aire.pdf
- Huzzat, A., Anpalagan, A., Khwaja, A. S., Woungang, I., Alnoman, A. A., & Pillai, A. S. (2025). A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities. *Digital Engineering*, 4, 100040. <https://doi.org/10.1016/j.dte.2025.100040>
- Hu, L., & Tao, F. (2021). Digital twin-driven crashworthy design of vehicles. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 71, 102147.
- Jones, R. M. (2017). *Indoor Air Quality and Health*. Routledge.
- Kopetz, H. (2011). *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Springer.
- Linares, C., & Díaz, J. (2008, septiembre 1). ¿Qué son las PM_{2,5} y cómo afectan a nuestra salud? • *Ecologistas en Acción*. *Ecologistas en Acción*.
<https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>
- Lorente Ros, Á., Antoñana Ugalde, S., Izquierdo Bajo, Á., & Carrillo Alemán, L. (2024). Contaminación ambiental y salud cardiovascular: Enfoque integral y nuevas evidencias. *REC: CardioClinics*, 59, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.rccl.2024.09.002>
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- Li, X., Li, D., Wan, J., Vasilakos, A. V., Lai, C. F., & Wang, S. (2017). A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, 23(1), 23-41.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I., Huang, Y., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837.
- Mamodiya, U., Kalam, A., Hu, Y.-C., & Goyal, D. (2025). Accelerating Product Development Cycles With Digital Twins and IoT Integration. En <https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/979-8-3373-2028-1>. IGI Global.
<https://www.igi-global.com/book/accelerating-product-development-cycles-digital/www.igi-global.com/book/accelerating-product-development-cycles-digital/367271>
- Medio ambiente y sociedad: Conceptos, metodologías y experiencias de las ciencias sociales y humanas. (2010). RIL Editores.

Medioambiente y salud cardiovascular: Causas, consecuencias y oportunidades en prevención y tratamiento. (2022). *Revista Española de Cardiología*, 75(12), 1050-1058.
<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2022.05.022>

Microsoft. (2023). Documentación de Azure IoT Hub: Conceptos de Gemelos Digitales.
<https://learn.microsoft.com/es-es/azure/iot-hub/about-iot-hub>

Mineraud, J., Mazhelis, O., Su, X., & Tarkoma, S. (2015). A gaps analysis of IoT platforms. *Computer Communications*, 50, 84-95.

Morales, F., Montoya, F. G., Trivino, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). Optimizing the deployment of air quality monitoring stations using an algorithm based on the kriging variance. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(1), 32.

Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. (2015). **ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE** – Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias.
<https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/indice-de-la-calidad-del-aire/>

OEHHA. (2016, febrero 26). PM2.5 [Text]. <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25>

Organización Mundial de la Salud. (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: particulado (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240034921>

Prisma. (2024, octubre 15). Qué es el índice de calidad del aire (ICA) y cómo se calcula. Eurofins Environment Testing Spain. <https://www.eurofins-environment.es/es/indice-de-calidad-del-aire/>

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593.

Rashid, Z., Melchiorre, J., Antoniazzi, F., Crivellari, A., Fontana, A., & Korkua, O. (2020). A systematic review of Digital Twin applications in smart healthcare. *Sensors*, 21(1), 251.

Razzaque, M. A., Milojevic-Jevric, M., Palade, A., & Clarke, S. (2016). Middleware for Internet of Things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(1), 70-95.

Schleicher, J. M., Vögeli, B., & Blum, M. (2019). A cloud-based architecture for digital twins in manufacturing. *Procedia CIRP*, 81, 918-923.

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637-646.

Spachos, P., Song, L., & Hatzinakos, D. (2018). Prototyping an IoT urban air quality monitoring platform. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21(5), 34-39.

- Sánchez, J. S., & Villalba, M. (2022). Importancia del monitoreo de material particulado en salas blancas: una revisión de la inocuidad en quirófanos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Médica*, 14(2), 45-58.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415.
- Vargas, F., Mocholi, J. A., & Jaén, J. A. (2017). A data-driven approach for indoor air quality modeling. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(3), 275-289.
- Wokwi. (2024). Wokwi Documentation: Simulator for Arduino, ESP32 and Raspberry Pi Pico. <https://docs.wokwi.com/>
- Warkentin, M., & Orgeron, C. (2020). Using the security triad to assess blockchain technology in public sector applications. *International Journal of Information Management*, 52, 102090.
- Warkentin, M., & Orgeron, C. (2020). Using the security triad to assess blockchain technology in public sector applications. *International Journal of Information Management*, 52, 102090.
- Xiao, F., Chen, C., & Wu, G. (2020). Maximizing reliability of communication networks in smart grids under cybersecurity constraints. *Reliability Engineering & System Safety*, 199, 106921.
- Yan, J., Meng, Y., Lu, L., & Li, L. (2021). Industrial big data analytics for prediction of remaining useful life based on deep learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(1), 139-154.
- Zhang, C., Tao, F., Liu, A., & Nee, A. Y. (2017). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art and Future Perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415.
- Zheng, Y., Capretz, L. F., & Zhou, L. (2021). An ontology-based approach to Digital Twin modeling for smart manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 160, 107531.
- Zhou, Z., Chen, X., Li, E., Min, G., & Wu, D. (2019). Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence with Edge Computing. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1738-1762.
- ZigBee Alliance. (2021). Matter Specification Version 1.0. Connectivity Standards Alliance.