

Un sistema IoT portátil y de bajo costo para el monitoreo urbano de ruido y calidad del aire: estudio de caso en San Salvador

A Low-Cost Portable IoT System for Urban Noise and Air Quality Monitoring:
A Case Study in San Salvador

Omar Otoniel Flores-Cortez

Universidad Tecnológica de El Salvador

[ORCID: 0000-0003-1754-4090](https://orcid.org/0000-0003-1754-4090)

Resumen:

La contaminación acústica y del aire en entornos urbanos constituye una amenaza creciente para la salud y el bienestar de las personas. Este trabajo presenta el desarrollo y validación de un sistema portátil IoT de bajo costo para el monitoreo simultáneo de ruido y calidad del aire en la ciudad de San Salvador. El sistema integra sensores digitales y transmisión de datos en tiempo real hacia la nube. Los resultados evidencian diferencias significativas en los niveles de contaminación entre el centro histórico y el campus universitario, demostrando el potencial de esta tecnología para apoyar políticas ambientales locales.

Palabras clave: Internet de las Cosas (IoT), contaminación acústica, calidad del aire, monitoreo ambiental, San Salvador

Abstract:

Urban noise and air pollution are increasing threats to public health and well-being. This paper presents the development and validation of a low-cost portable IoT system for real-time monitoring of noise and air quality in San Salvador, El Salvador. The system integrates digital sensors and cloud data transmission for spatial profiling of pollution levels. Results show significant differences between the historical downtown and university campus, highlighting the potential of this technology to support environmental research and policy-making in urban sustainability initiatives.

Keywords: Internet of Things (IoT), noise pollution, air quality, environmental monitoring, San Salvador

Introducción

El crecimiento urbano y la densificación del tránsito vehicular en las principales ciudades latinoamericanas han incrementado los niveles de contaminación acústica y atmosférica. En particular, San Salvador presenta condiciones donde el ruido y la calidad del aire afectan tanto la salud física como mental de sus habitantes. Diversos estudios internacionales (Heroux et al., 2015; Krzyzanowski & Cohen, 2008) evidencian la relación entre exposición prolongada a altos niveles de ruido con el estrés y pérdida auditiva, mientras que contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) y los compuestos orgánicos volátiles (TVOC) están asociados a problemas respiratorios y cardiovasculares.

Sin embargo, en El Salvador existe una brecha tecnológica y científica: la falta de equipos asequibles para medir y analizar estas variables a nivel micro-urbano. Esta limitación impide la generación de datos locales que permitan diseñar políticas públicas informadas.

Frente a ello, este estudio propone un sistema portátil basado en Internet de las Cosas (IoT), de bajo costo y fácil implementación, capaz de recolectar datos georreferenciados de ruido (dB) y calidad del aire (AQI, CO₂, TVOC, temperatura y humedad).

El objetivo general fue diseñar, implementar y validar un sistema móvil IoT para el monitoreo ambiental urbano en dos zonas representativas de San Salvador: el Centro Histórico y el campus de la Universidad Tecnológica (UTEC).

La pregunta de investigación que guió este trabajo fue:

¿Es posible desarrollar una herramienta IoT portátil y de bajo costo que permita obtener datos fiables para caracterizar espacial y temporalmente la contaminación ambiental urbana?

Metodología:

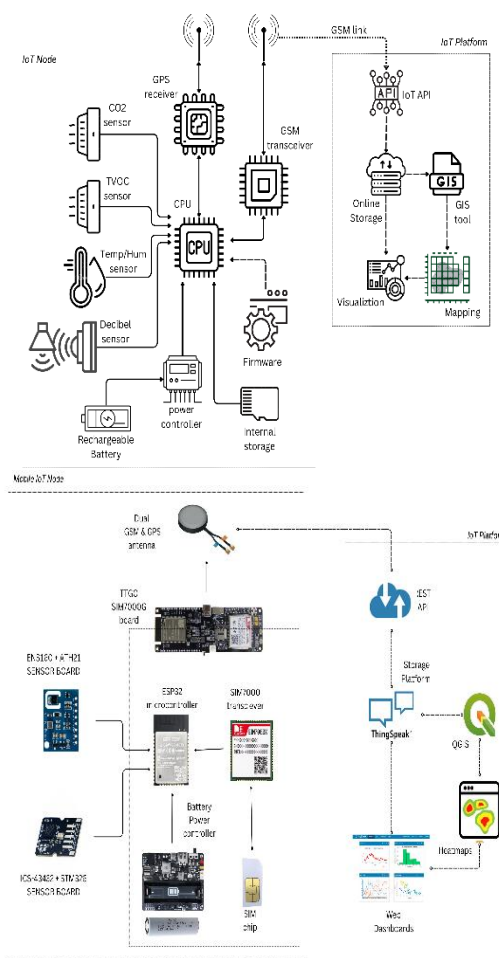
El estudio siguió el enfoque de investigación aplicada y tecnológica, utilizando la metodología de diseño estratificado para sistemas IoT (Flores-Cortez et al., 2025).

Diseño del sistema:

El sistema se estructuró en tres niveles:

- Capa física: incluye los sensores ICS-43434 (ruido), ENS160 (calidad del aire), y AHT21 (temperatura y humedad), integrados mediante una placa ESP32 con módulo GSM SIM7000G para comunicación 2G.
- Capa de red: transmisión de datos en tiempo real hacia la plataforma *ThingsBoard Cloud* usando protocolo MQTT.
- Capa de aplicación: almacenamiento y visualización de datos, complementado con procesamiento estadístico y generación de mapas de calor en Python y QGIS.

Figura 1
Arquitectura operacional y funcional del sistema IoT propuesto.



Nota: En la figura se puede ver el diseño completo de la arquitectura tanto funcional como operacional para el sistema, se presentan los bloques funcionales y hardware que conforman el sistema.

Fuente: Diseño propio.

Procedimiento de campo:

Se realizaron recorridos pedestres durante siete días consecutivos, en tres horarios (8:00 a.m., 12:00 m.d. y 5:00 p.m.) en cada zona. Los dispositivos fueron transportados en mochilas por los investigadores, registrando datos cada 30 segundos, ver figura 2.

Variables medidas: ruido (dB), índice de calidad del aire (AQI), dióxido de carbono (eCO_2), compuestos orgánicos volátiles (TVOC), temperatura ($^{\circ}C$) y humedad relativa (%).

Figura 2

Prototipo del nodo sensor del sistema IoT propuesto.



Nota: En la figura se puede ver la implementación del prototipo del nodo sensor y la forma en cómo se realizaron los recorridos de validación en campo.

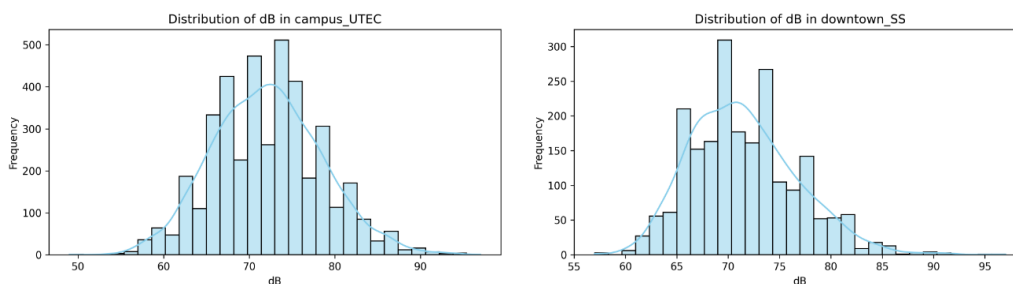
Fuente: Diseño propio.

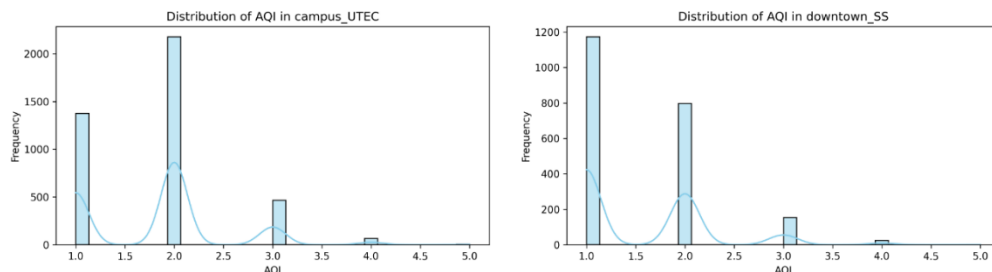
Resultados:

Los resultados mostraron diferencias claras entre las dos zonas. En promedio, el Centro Histórico presentó niveles de ruido de 73.4 dB, mientras que en el campus UTEC los valores promediaron 72.8 dB. En cuanto al AQI, el centro alcanzó 2.8, frente a 2.3 en UTEC, ver figura 3.

Figura 3

Histogramas de la distribución de valores medidos en las zonas de prueba.





Nota: En la figura se muestra la distribución de los valores recolectados tanto para nivel del ruido (dB) como del índice de calidad de aire (AQI).

Fuente: Diseño propio.

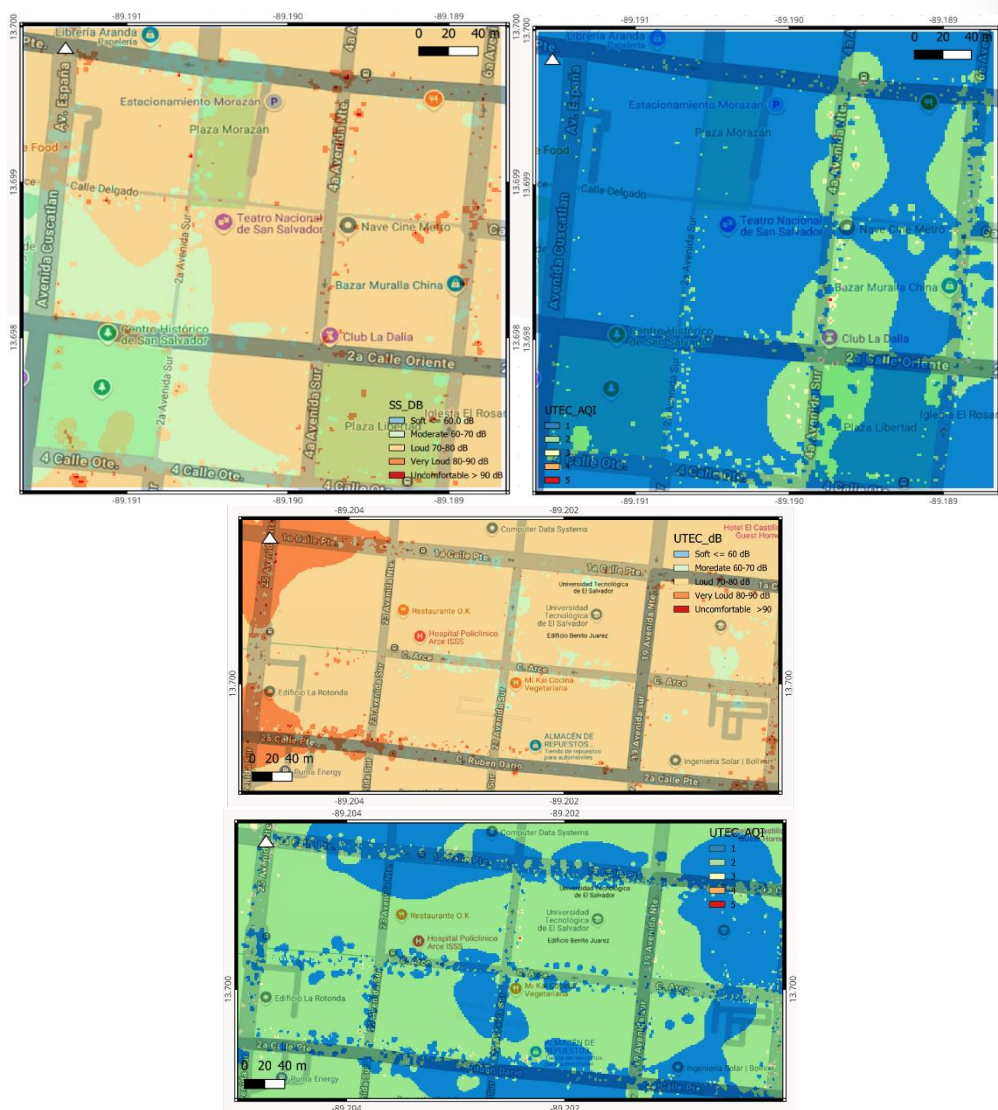
El análisis temporal reveló que los picos más altos de ruido se registraron entre las **10:00 y 11:00 horas**, mientras que el AQI alcanzó sus máximos entre **16:00 y 17:00 horas**.

La prueba t de Student confirmó diferencias estadísticamente significativas entre ambas zonas para dB ($t=4.275$, $p=0.00002$) y AQI ($t=14.438$, $p<0.00001$), lo que indica que el tráfico y la densidad peatonal influyen en la contaminación ambiental de manera distinta.

Mediante interpolación IDW en QGIS se generaron **mapas de calor** que evidencian puntos críticos de contaminación acústica y atmosférica en áreas de mayor tránsito vehicular y actividad comercial.

Figura 4

Mapas de distribución espacial de contaminación acústica y atmosférica en las zonas estudiadas.



Nota: En la figura se muestra los mapas de distribución espacial del promedio semanal de la contaminación acústica (Izq.) y atmosférica (Der.) en Centro San Salvador (Superior) y en el Campus UTEC (Inferior). Fuente: Diseño propio.

Discusión:

Los resultados coinciden con investigaciones similares realizadas en contextos urbanos de América Latina, como México (Quintero et al., 2023) y Colombia (Guevara et al., 2018), donde se identifican patrones de contaminación correlacionados con densidad vehicular y ausencia de vegetación. Sin embargo, en la región Centroamericana, y en especial El Salvador, no se encontraron estudios similares.

Este trabajo reafirma que las soluciones IoT de bajo costo son efectivas para estudios ambientales de pequeña escala, democratizando el acceso a datos y fomentando la ciencia

ciudadana. Asimismo, el sistema propuesto representa una alternativa viable frente a los costos de estaciones fijas tradicionales.

Conclusión:

El trabajo demostró que es posible desarrollar e implementar un sistema IoT portátil y económico para el monitoreo urbano de ruido y calidad del aire con resultados estadísticamente válidos.

Las diferencias encontradas entre zonas reflejan la necesidad de fortalecer la gestión ambiental urbana mediante evidencia local.

En el futuro se planea escalar la red de monitoreo, incorporar sensores de material particulado y aplicar modelos de predicción basados en inteligencia artificial para anticipar picos de contaminación.

Referencias

- Flores-Cortez, O., Arévalo, F., & Pocasangre, C. (2025). A layered design methodology proposal for IoT Systems: A framework for academic research projects. *Revista Entorno*, (79), 25–35. <https://revistas.utec.edu.sv/index.php/entorno/article/view/1066/1683>
- Héroux, M. E., Babisch, W., Belojevic, G., Brink, M., Janssen, S., Lercher, P., Paviotti, M., Pershagen, G., Persson Waye, K., Preis, A., Stansfeld, S., van den Berg, M., & Verbeek, J. (2015, May). WHO environmental noise guidelines for the European Region. In *Proceedings of Euronoise 2015* (Vol. 2015, pp. 2589-2593). <https://surl.li/fzmroe>
- Guevara Luna, F.A., Guevara Luna, M.A., Rojas Roa, R., & Yezid, N. (2018). Spatial-temporal assessment and mapping of the air quality and noise pollution in a sub-area local environment inside the center of a Latin American Megacity: Universidad Nacional de Colombia-Bogotá Campus. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12(3), 232–243. <https://doi.org/10.5572/ajae.2018.12.3.232>
- Quintero, C. C. O., Córdoba, J. A. O., & Ordoñez, H. A. (2023). Prototype for monitoring noise pollution as a tool for the empowerment of society. *Inge CuC*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.19.1.2023.01>
- Krzyzanowski, M., & Cohen, A. (2008). Update of WHO air quality guidelines. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1(1), 7-13. <https://doi.org/10.1007/s11869-008-0008-9>