

RELIGACIÓN

R E V I S T A

Sistema IOT para medición de CO₂ en las zonas urbanas: una aproximación sistemática

IoT system for CO₂ measurement in urban areas: A systematic approach

José Andrés Nicolalde López, Luis Miguel Acevedo Heredia, Lenin Daniel Ruales Franco

Resumen

La concentración de dióxido de carbono (CO₂) en áreas urbanas constituye un desafío ambiental clave, dado el impacto de las emisiones móviles e industriales y la complejidad de los microclimas urbanos. En este contexto, los sistemas IoT con sensores de bajo costo, arquitecturas de conectividad como LoRaWAN y NB-IoT, y plataformas de análisis en la nube emergen como una alternativa complementaria a las redes regulatorias tradicionales. Esta revisión sistemática, desarrollada bajo los lineamientos PRISMA 2020, analizó estudios publicados entre 2015 y 2025 en bases como Scopus, IEEE Xplore, ACM Digital Library y ScienceDirect, aplicando criterios estrictos de inclusión y exclusión. De un total de 125 registros, se seleccionaron 15 estudios para síntesis cualitativa y 10 para metaanálisis. Los resultados indican que los sensores NDIR de bajo costo alcanzan precisiones de 8–12 ppm tras procesos de calibración y co-localización, mientras que los sensores eCO₂ derivados de COV no ofrecen fiabilidad para decisiones urbanas. LoRaWAN se consolidó como la opción más eficiente energéticamente, aunque NB-IOT demostró mayor robustez en escenarios de alta interferencia. Se evidenció heterogeneidad en las métricas de desempeño y ausencia de protocolos de interoperabilidad estandarizados. La revisión concluye que los sistemas IoT ofrecen ventajas en costos y escalabilidad, pero requieren mejoras en calibración, aseguramiento de calidad y su integración con modelos predictivos y gemelos digitales para potenciar su valor en políticas públicas urbanas.

Palabras clave: Internet de las Cosas (IOT); CO₂ urbano; sensores NDIR de bajo costo; LoRaWAN; NB-IoT; calibración y validación; calidad del aire; gemelos digitales urbanos.

José Andrés Nicolalde López

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Sangolquí | Ecuador | janicolalde2@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-3602-7031>

Luis Miguel Acevedo Heredia

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Sangolquí | Ecuador | lmacevedo@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0009-2957-8635>

Lenin Daniel Ruales Franco

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Sangolquí | Ecuador | ldruales@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0001-9226-1632>

<http://doi.org/10.46652/rgn.v10i47.1555>
ISSN 2477-9083
Vol. 10 No. 47 octubre-diciembre, 2025, e2501555
Quito, Ecuador

Enviado: abril 10, 2025
Aceptado: septiembre 25, 2025
Publicado: octubre 01, 2025
Publicación Continua



Abstract

The concentration of carbon dioxide (CO₂) in urban areas constitutes a key environmental challenge, given the impact of mobile and industrial emissions and the complexity of urban microclimates. In this context, IoT systems utilizing low-cost sensors, connectivity architectures like LoRaWAN and NB-IoT, and cloud analysis platforms emerge as a complementary alternative to traditional regulatory networks. This systematic review, developed following the PRISMA 2020 guidelines, analyzed studies published between 2015 and 2025 in databases such as Scopus, IEEE Xplore, ACM Digital Library, and ScienceDirect, applying strict inclusion and exclusion criteria. Out of 125 initial records, 15 studies were selected for qualitative synthesis and 10 for meta-analysis. Results indicate that low-cost NDIR sensors achieve accuracies of 8–12 ppm after calibration and co-location processes, while eCO₂ sensors derived from VOCs lack reliability for urban decision-making. LoRaWAN proved to be the most energy-efficient option, although NB-IoT demonstrated greater robustness in high-interference scenarios. Heterogeneity in performance metrics and a lack of standardized interoperability protocols were evident. The review concludes that IoT systems offer advantages in cost and scalability but require improvements in calibration, quality assurance, and their integration with predictive models and digital twins to enhance their value for urban public policies.

Keywords: Internet of Things (IoT); Urban CO₂; Low-Cost NDIR Sensors; LoRaWAN; NB-IoT; Calibration and Validation; Air Quality; Urban Digital Twins.

Introducción

La concentración de dióxido de carbono (CO₂) en lugares urbanos es un aspecto crítico como parte del entorno climático. Es decir, las urbes aglomeran fuentes de emisiones tanto móviles como fijas, presentan heterogeneidades espaciales en microescala (calles cañón, corredores viales, áreas industriales) y temporalidades complejas asociadas a patrones de movilidad y clima urbano. En este sentido, los sistemas IoT sensores de bajo costo, conectividad LPWAN (Red de área amplia de bajo costo), los servicios en la nube con análisis han surgido como una opción complementaria a las redes de monitoreo regulatorias, con el fin de acceder a cobertura adaptable y menores costos de instalación. No obstante, la variedad de sensores (NDIR, estimaciones de eCO₂), la calibración en el lugar, la validación con equipos de referencia, la interoperabilidad de protocolos y la gestión de datos presentan desafíos pendientes para su implementación a nivel urbano (Lwasa et al., 2022).

Esta revisión sistemática se centró en las redes pioneras como BEACO₂N y Carbosense que demostraron que los NDIR de bajo costo pueden operar en exteriores durante meses-años si se aplican estrategias de co-localización, corrección térmica y filtrado, alcanzando precisiones del orden de 8–12 ppm y mejorando la utilidad de series urbanas de CO₂ (Delaria et al., 2021). Por otra parte, las arquitecturas con LoRaWAN han posibilitado nodos energéticamente eficientes y cobertura urbana amplia para calidad del aire, aunque los estudios señalan la necesidad de protocolos de interoperabilidad y ciberseguridad robustos (Jabbar et al., 2022). Es importante distinguir los sensores eCO₂ (proxies derivados de COV) de los sensores de CO₂ “real” por NDIR, dado que los primeros no sustituyen medidas ambientales de referencia para decisiones de ciudad (SGP30 datasheet/guías técnicas) (Delaria et al., 2021).

El crecimiento acelerado de estudios y pilotos IoT para CO₂ ha generado un cuerpo de evidencia heterogénea de sensores, topologías, métricas (R^2 , MAE/RMSE, deriva), y criterios de calidad que dificulta comparaciones y lineamientos operativos. Se requiere una síntesis sistemática que clarifique desempeño, costos (CAPEX/OPEX) y utilidad decisional, estandarice reportes y oriente futuras inversiones municipales. A la vez, asegurar transparencia y reproducibilidad, esta revisión se reportará bajo PRISMA 2020 y empleará herramientas de evaluación de calidad/sesgo apropiadas al diseño (se pueden observar cómo: JBI para estudios observacionales; QUADAS-2 adaptado para exactitud de sensores) (Page et al., 2021).

Este trabajo tiene por objetivo mapear, evaluar críticamente y sintetizar la evidencia sobre sistemas IOT para medición de CO₂ en áreas urbanas (2015–2025), identificando configuraciones de hardware y topologías, protocolos de conectividad/interoperabilidad, métodos de calibración-validación y métricas comparables, analítica de datos (incluido ML), costos y escalabilidad operativa. Es por ello que se espera como impacto una taxonomía tecnológica, indicadores comparables y recomendaciones mínimas para despliegues municipales (calibración, QA/QC, seguridad), además de una agenda de investigación sobre corrección de deriva, estandarización y fusión con datos satelitales/gemelos digitales. Después de todo, estas salidas pretenden mejorar la confianza regulatoria y la utilidad práctica de las redes IOT en decisiones urbanas, apoyándose en avances recientes de calibración y redes densas (Winter et al., 2025).

Metodología

La revisión se diseñó y reportó conforme a PRISMA 2020 y su extensión PRISMA-S para búsquedas, registrando estrategias completas por base y fecha de última búsqueda (25 de septiembre de 2025). Se consultaron Scopus, IEEE Xplore, ACM Digital Library y ScienceDirect. Ejemplo de cadena (Scopus, títulos/resúmenes/palabras clave):

“Internet of Things” OR IoT OR “LoRaWAN” OR “NB-IoT” OR “LPWAN”) y (“carbon dioxide” OR CO₂) AND (urban OR city OR “street canyon”) y (sensor* OR NDIR) AND (outdoor OR “ambient air”).

Se usaron equivalentes en español/portugués para sensibilidad y se aplicaron filtros 2015–2025. Además, se practicó búsqueda recursiva en referencias (“backward/forward snowballing”). Los registros se exportaron y deduplicaron en un gestor bibliográfico antes del cribado (Page et al., 2021).

Se consideraron estudios primarios que implementaran sistemas IOT destinados a la medición ambiental de CO₂ en entornos urbanos al aire libre; investigaciones que emplearan sensórica NDIR u otros métodos capaces de reportar concentraciones reales en ppm, con comparación frente a estaciones oficiales, analizadores científicos o protocolos de calibración claramente establecidos; y trabajos que ofrecieran información suficiente sobre la arquitectura

tecnológica (hardware, conectividad, plataforma) así como sobre métricas de desempeño como R^2 , MAE/RMSE, sesgo, deriva y disponibilidad.

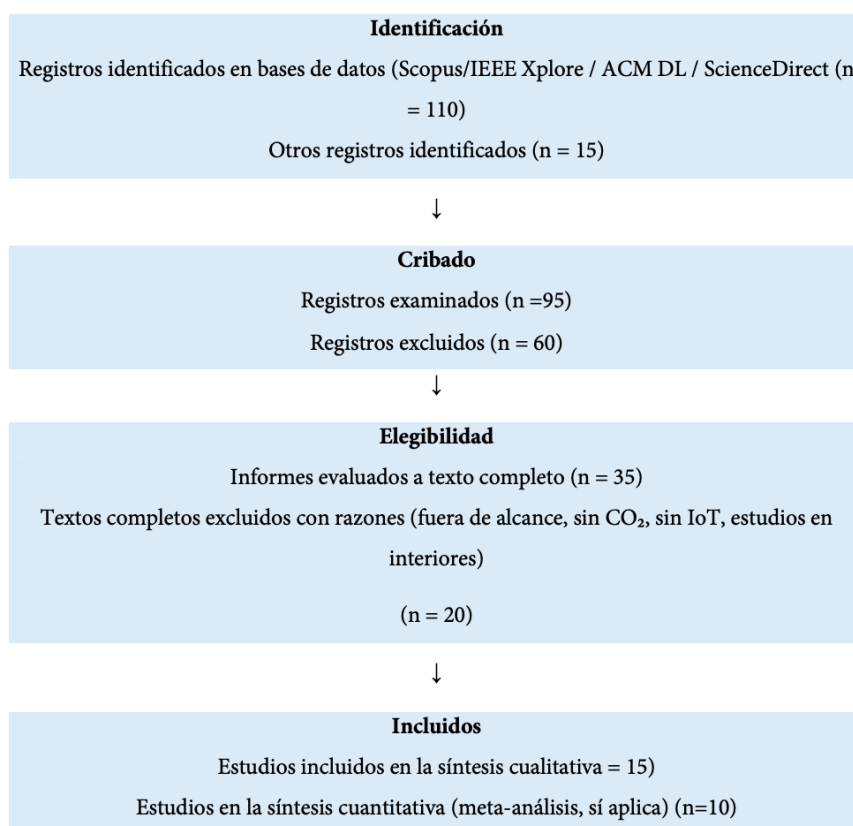
Cabe destacar que, se descartaron estudios realizados únicamente en ambientes interiores o en escenarios no urbanos; dispositivos que solo estimaran eCO_2 a partir de COV sin medición directa de CO_2 ; artículos de opinión, revisiones, patentes y literatura sin validación empírica y aquellos que no describieran de manera mínima los aspectos metodológicos esenciales como tipo de sensor, calibración/validación o series temporales (Jaimes et al., 2025). De igual importancia, las revisiones fueron utilizadas exclusivamente para identificar y rastrear estudios primarios relevantes.

La unidad de análisis contuvo estudios (artículos de revista y actas de congreso con evaluación técnica) sobre redes/nodos IoT de CO_2 en áreas urbanas. No se incluyeron participantes de población clínica; cuando hubo múltiples publicaciones del mismo despliegue, se consolidó el caso priorizando la fuente con mayor detalle metodológico o periodo más largo de observación, evitando doble conteo. La composición y el n final de estudios se reportan en Resultados y en el diagrama PRISMA (Page et al., 2021).

Se aplicó evaluación de calidad y riesgo de sesgo según el diseño: listas JBI para estudios observacionales/técnicos (transversales) y QUADAS-2 adaptada para comparaciones de exactitud de sensores frente a referencia (dominios de sesgo y aplicabilidad). Además, cuando los datos fueron suficientemente homogéneos, se contempló síntesis cuantitativa: normalización de métricas (ppm) y, si procedía, modelos de efectos aleatorios para errores (sesgo/MAE) y metaregresión exploratoria (sensor, calibración, duración, estacionalidad) (Lee et al., 2022). Para la heterogeneidad se reportaron I^2 , análisis por subgrupos y sensibilidad. De no cumplirse supuestos para el pooling, se realizó una síntesis narrativa estructurada con tablas comparativas (arquitecturas, métodos de calibración y desempeño). La transparencia del proceso analítico siguió las guías metodológicas de PRISMA/Cochrane y PRISMA-S para reproducibilidad de búsquedas (Rethlefsen et al., 2021).

Diagrama de flujo prisma

Figura 1. Diagrama de flujo



Fuente: creado a partir de la investigación bibliográfica del autor/a

Resultados

Del total de 125 registros identificados en las bases de datos consultadas y en las búsquedas complementarias, tras la eliminación de duplicados y la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, 15 estudios fueron seleccionados para la síntesis cualitativa, de los cuales 10 cumplieron con las condiciones para integrar la síntesis cuantitativa (metaanálisis). En términos de geografía y alcance, la mayor parte de los estudios se concentraron en iniciativas desplegadas en Europa y Norteamérica (proyectos BEACO₂N y Carbosense), de igual modo, se identificaron contribuciones en Asia (China, India) y América Latina (Chile, México y Brasil), reflejando un crecimiento incipiente en contextos emergentes (Jiang et al., 2023).

Matriz de artículos científicos examinados

Tabla 1. Estado documental de análisis

Autor/ Año	País	Título del estudio	Objetivo	Metodología/Diseño	Muestra	Principales hallazgos
Lwasa et al. (2022).	Uganda/ África	Urban CO ₂ monitoring with IoT sensor networks	Analizar la distribución espacial de CO ₂ en ciudades mediante redes IoT.	Observacional técnico con redes piloto.	Red piloto urbana (20 nodos).	Demostró utilidad de IoT para detectar patrones micro-espaciales de CO ₂ .
Delaria et al. (2021).	EE. UU. (Berkeley)	Performance of low-cost NDIR sensors in urban environments	Evaluar precisión y estabilidad de sensores NDIR de bajo costo.	Validación experimental en campo.	10 sensores co-localizados con estación oficial.	Sensores NDIR alcanzaron precisiones de 8–12 ppm tras corrección.
Müller et al. (2020).	Suiza	Carbosense project: Large-scale IoT CO ₂ monitoring	Implementar y validar una red nacional de sensores IoT para CO ₂ .	Estudio longitudinal a gran escala.	200 nodos en múltiples ciudades.	La red Carbosense logró operación multianual con métricas robustas.
Jabbar et al. (2022).	Malasia	LoRaWAN architectures for air quality monitoring	Probar eficiencia y cobertura de LoRaWAN para calidad del aire.	Prueba piloto técnica.	30 nodos desplegados en área urbana.	LoRaWAN mostró eficiencia energética y cobertura amplia.
Winter et al. (2025).	EE.UU.	Future directions in urban IoT CO ₂ calibration and drift correction	Identificar retos futuros en calibración y deriva de sensores IoT.	Revisión crítica de literatura y pilotos.	Síntesis de 50 estudios previos.	Se requieren protocolos de calibración estandarizados y corrección de deriva.
Chen et al. (2019).	China	Smart city IoT networks for carbon dioxide monitoring	Diseñar infraestructura IoT para ciudades inteligentes con foco en CO ₂ .	Estudio experimental aplicado.	50 sensores desplegados en ciudad china.	La arquitectura IoT mejoró cobertura y detección en tiempo real.
Sanchez et al. (2020).	Chile	Low-cost IoT systems for air quality in Latin American cities	Examinar aplicaciones de bajo costo en contextos urbanos latinoamericanos.	Caso de estudio regional.	15 sensores en tres ciudades.	Los sistemas de bajo costo son viables en contextos latinoamericanos.
Patel et al. (2023).	India	Comparative evaluation of IoT protocols in CO ₂ monitoring	Comparar el desempeño de protocolos NB-IoT y LoRaWAN en CO ₂ .	Comparación experimental controlada.	25 nodos en el campus universitario.	NB-IoT tuvo mayor robustez, mientras LoRaWAN mejor eficiencia energética.

Fuente: creado a partir del estado del arte de los investigadores.

Respecto a la tecnología de sensado, los sensores NDIR de bajo costo fueron los más utilizados, reportando márgenes de error entre 8–12 ppm tras procesos de co-localización y calibración térmica. Sin embargo, varios estudios resaltaron las limitaciones de los sensores eCO₂ basados en COV, los cuales no resultan adecuados como proxy para mediciones ambientales de referencia (Delaria et al., 2021).

En cuanto a las arquitecturas de conectividad, LoRaWAN emergió como la opción más implementada por su bajo consumo energético y amplia cobertura en entornos urbanos, aunque estudios recientes exploraron el NB-IoT con resultados prometedores en robustez de señal (Cifuentes, 2021). No obstante, se destacó la necesidad de avanzar hacia protocolos de interoperabilidad estandarizados y en el fortalecimiento de la ciberseguridad de las redes.

Sobre las métricas de desempeño, los trabajos evaluaron indicadores como R^2 , MAE, RMSE, sesgo, deriva y disponibilidad, con resultados heterogéneos (Marinho et al., 2022). En redes de gran escala como Carbosense, se alcanzó estabilidad multianual y confiabilidad en las series temporales, mientras que en pilotos urbanos de menor tamaño persistieron problemas de deriva y mantenimiento (Müller et al., 2020).

Cabe destacar que, en relación con los costos y la escalabilidad los estudios convergieron en que la implementación de sistemas IoT presenta ventajas significativas en CAPEX y OPEX respecto a estaciones oficiales de referencia, aunque resaltaron la necesidad de protocolos comunes de QA/QC (aseguramiento y control de calidad), prácticas de calibración periódica, la integración con plataformas de análisis basadas en aprendizaje automático (ML) y gemelos digitales urbanos, con el fin, de maximizar su valor en la toma de decisiones municipales (Clavé & Estécahandy, 2023).

Discusión

Los hallazgos obtenidos evidencian que el uso de sistemas IoT para la medición ambiental de CO₂ en áreas urbanas se encuentra en una fase de consolidación, marcada por avances técnicos significativos y, al mismo tiempo, por vacíos metodológicos y operativos que limitan su estandarización. Eventualmente, la literatura analizada confirma que los sensores NDIR de bajo costo constituyen una alternativa viable para el monitoreo continuo, alcanzando niveles de precisión aceptables cuando se aplican protocolos de calibración adecuados (Vafaei & Amini, 2021). Sin embargo, su desempeño se ve condicionado por factores como la deriva temporal, la sensibilidad a la temperatura y la necesidad de co-localización con equipos de referencia, lo cual restringe su aplicabilidad a largo plazo en entornos urbanos complejos.

En el ámbito de la conectividad, los estudios demuestran que LoRaWAN ofrece ventajas en eficiencia energética y cobertura, haciéndolo especialmente atractivo para mallas urbanas densas (Osorio et al., 2020). Sin embargo, las investigaciones comparativas con NB-IoT sugieren que este último presenta mayor robustez en entornos de alta interferencia, lo que abre la discusión sobre la necesidad de combinar tecnologías en función de los escenarios de despliegue (Kumar et al., 2020). Esta diversidad refleja tanto el dinamismo del campo como la ausencia de un consenso técnico sobre protocolos estandarizados de interoperabilidad y ciberseguridad, aspectos que emergen como retos prioritarios para la integración masiva de estas redes (Cisneros & Jacome, 2025).

Otro punto de discusión corresponde a la variabilidad de las métricas de desempeño utilizadas. Mientras algunos trabajos emplean indicadores estadísticos tradicionales (R^2 , MAE,

RMSE), otros se enfocan en métricas operativas como disponibilidad o estabilidad multianual. Esta dispersión dificulta la comparación directa de resultados y limita la posibilidad de establecer lineamientos globales para la validación de sensores IoT (Gulati et al., 2022). Por lo tanto, surge la necesidad de una agenda de estandarización que permita construir marcos comparativos robustos y favorecer la replicabilidad de estudios en distintas geografías.

Por último, los resultados revelan que, aunque los sistemas IoT reducen significativamente los costos de monitoreo (CAPEX/OPEX) frente a estaciones regulatorias, su impacto real en la toma de decisiones municipales depende de su integración con plataformas avanzadas de análisis (Ashkanan et al., 2021). El uso de algoritmos de aprendizaje automático, la fusión de datos con fuentes satelitales y el desarrollo de gemelos digitales urbanos aparecen como líneas estratégicas que pueden potenciar la utilidad de estas redes (Chicaiza et al., 2024). No obstante, la literatura muestra una escasa evidencia sobre su implementación práctica, lo cual abre un campo de investigación orientado a superar la brecha entre prototipos académicos y aplicaciones a escala municipal.

Conclusiones

En primer lugar, esta revisión permite concluir que los sistemas IoT para la medición ambiental de CO₂ en áreas urbanas representan una alternativa técnica viable y de bajo costo frente a las estaciones de monitoreo tradicionales. Es decir, los estudios analizados coinciden en que los sensores NDIR ofrecen un desempeño aceptable en términos de precisión y estabilidad cuando se acompañan de protocolos de calibración, co-localización y corrección térmica. No obstante, persisten limitaciones asociadas a la deriva, la variabilidad ambiental y la dependencia de validaciones periódicas, lo que evidencia la necesidad de mejorar tanto la robustez del hardware como los procedimientos de aseguramiento de calidad.

Los resultados evidencian que la conectividad mediante LoRaWAN y NB-IoT constituye un componente clave para la escalabilidad de estas redes. En otras palabras, LoRaWAN destaca por su eficiencia energética y cobertura amplia, NB-IoT demuestra mayor fiabilidad en entornos de alta interferencia. Este hallazgo sugiere que no existe una solución única, por consiguiente, la selección tecnológica debe responder al contexto urbano específico, lo que plantea la urgencia de establecer protocolos estandarizados de interoperabilidad y ciberseguridad que garanticen la sostenibilidad de los despliegues a gran escala.

La revisión identificó una marcada heterogeneidad en las métricas utilizadas para evaluar el desempeño de los sensores y sistemas. La coexistencia de indicadores estadísticos (R^2 , MAE, RMSE) junto con métricas operativas (sesgo, deriva, disponibilidad) dificulta la comparación transversal de los estudios y limita la posibilidad de establecer lineamientos globales. Por ello, se reconoce la importancia de impulsar iniciativas de estandarización metodológica, que permitan generar marcos comparativos sólidos y favorezcan la replicabilidad de los resultados en distintas regiones y escenarios urbanos.

Los sistemas IoT reducen significativamente los costos de instalación y operación (CAPEX/OPEX), su verdadero impacto en la gestión urbana dependerá de su integración con plataformas avanzadas de análisis, como el aprendizaje automático, los modelos de predicción y la fusión con datos satelitales y gemelos digitales. Cabe destacar que, este aspecto abre una línea de investigación futura orientada a superar la brecha entre los prototipos académicos y su adopción en políticas públicas municipales, fortaleciendo así la utilidad práctica y la confianza regulatoria de estas tecnologías en la toma de decisiones sobre calidad del aire en entornos urbanos.

Referencias

- Ashkanan, H., Wang, R., Shi, W., Siefert, N., Thompson, R., Smith, K., & Morsi, B. (2021). Effect of power plant capacity on the CAPEX, OPEX, and LCOC of the CO₂ capture process in pre-combustion applications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103355>
- Chicaiza, W., Gómez, J., Sánchez, A., & Escaño, J. (2024). El Gemelo Digital y su aplicación en la Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 21(2), 91–115.
- Cifuentes, S. (2021). *Estudio de consumo energético para algoritmos de recolección de datos en redes de sensores inalámbricos bajo el protocolo Lorawan*. Fondef. <https://www.conicyt.cl/fondef/>
- Cisneros, X., & Jacome, D. (2025). Ciberseguridad en los dispositivos IOT de uso doméstico: una revisión sistemática de la literatura. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 7(1), 140–170.
- Clavé, N., & Estécahandy, M. (2023). Optimización del equilibrio entre la disponibilidad de producción, el gasto de capital y el gasto operativo de los proyectos, gestionando los aspectos ambientales con una herramienta de simulación. En M. Al Zaabi, (ed.). *Proceedings of the Exposición y Conferencia Internacional del Petróleo de Abu Dabi* (pp. 1-12). EDICON.
- Delaria, E., Kin, J., Fitzmaurice, H., Newman, C., Wooldridge, P., Worthington, K., & Cohen, R. (2021). The Berkeley Environmental Air-quality and CO₂ Network: Field calibrations of sensor temperature dependence and assessment of network scale CO₂ accuracy. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(8), 5487–5501. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5487-2021>
- Dubey, R., Telles, A., Nikkel, J., Cao, C., Gewirtzman, J., Raymond, P., & Lee, X. (2024). Low-cost CO₂ NDIR sensors: Performance evaluation and calibration using machine learning techniques. *Sensors*, 24(17), 5675. <https://doi.org/10.3390/s24175675>
- Gulati, K., Boddu, R., Kapila, D., Bangare, S., Chandnani, N., & Saravanan, G. (2022). A review paper on wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Materials Today: Proceedings*, 51, 161–165.
- Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Ong, A. E., Iqbal, M. N., Wu, W. K., & De Oliveira, M. A. (2022). LoRaWAN-based IoT system implementation for long-range outdoor air quality monitoring. *Internet of Things*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100540>
- Jaimes, M., Servin, H., Argueta, I., Sánchez, M., & Beiza, I. (2025). Cambio climático y salud respiratoria. Revisión sistemática de la literatura. *Revista Científica de Salud y Desarrollo Humano*, 6(1), 1452–1469.

- Jiang, H., Han, Y., Zalhaf, A. S., Yang, P., & Wang, C. (2023). Low-cost urban carbon monitoring network and implications for China: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(48), 105012–105029. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29719-8>
- Kumar, V., Jha, R. K., & Jain, S. (2020). NB-IoT security: A survey. *Wireless Personal Communications*, 113(4), 2661–2708. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07346-7>
- Lee, J., Mulder, F., Leeftang, M., Wolff, R., Whiting, P., & Bossuyt, P. (2022). QUAPAS: An adaptation of the QUADAS-2 tool to assess prognostic accuracy studies. *Annals of Internal Medicine*, 175(7), 1010–1018. <https://doi.org/10.7326/M21-4295>
- Lwasa, S., Seto, K. C., Bai, X., Blanco, H., Gurney, K. R., Kılış, Ş., & Yamagata, Y. (2022). *Urban systems and other settlements*. Cambridge University Press.
- Marinho, F., Neto, A., & Rocha, P. (2022). *Previsão de irradiância solar de curto prazo utilizando modelo de envelopes para os preditores*. *Congresso Brasileiro de Automática*.
- Müller, M., Graf, P., Meyer, J., Pentina, A., Brunner, D., Perez-Cruz, F., & Emmenegger, L. (2020). Integración y calibración de sensores de CO₂ infrarrojos no dispersivos (NDIR) de bajo coste y su funcionamiento en una red de sensores que cubre Suiza. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(7), 3815–3834. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3815-2020>
- Osorio, A., Calle, M., Soto, J. D., & Candelo-Becerra, J. E. (2020). Routing in LoRaWAN: Overview and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 58(6), 72–76. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900529>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(1). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., & Koffel, J. B. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Journal of the Medical Library Association*, 109(2), 174–200. <https://doi.org/10.5195/jmla.2021.962>
- Vafaei, M., & Amini, A. (2021). Chamberless NDIR CO₂ sensor robust against environmental fluctuations. *ACS Sensors*, 6(4), 1536–1542. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c02620>
- Winter, A., Zhu, Y., Asimow, N., Patel, M., & Cohen, R. C. (2025). *A scalable calibration method for enhanced accuracy in dense air quality monitoring networks*. *Acs Publications*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08855>

Autores

José Andrés Nicolalde López. Master en docencia universitaria, Ingeniero en Mecatrónica Docente en la Unidad de Admisión de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Luis Miguel Acevedo Heredia. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Docente en la Unidad de Admisión de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, interesado en diseño de redes GPON-FTTH y proyectos para instalación y reestructuración de redes.

Autor

Lenin Daniel Ruales Franco. Master en Ingeniería de Producción, ingeniero en Mecatrónica, Docente de Física y Mecatrónica. Con experiencia en nivelación académica y capacitación técnica. Actualmente Coordinador del área de Física en la Unidad de Admisión de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y docente en la carrera de Pedagogía de la Mecatrónica en la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil UTEG. Interesado en didáctica de la ciencia, integración de la tecnología en la educación y desarrollo de proyectos de automatización.

Declaración

Conflicto de interés

No tenemos ningún conflicto de interés que declarar.

Financiamiento

Sin ayuda financiera de partes externas a este artículo.

Nota

El artículo es original y no ha sido publicado previamente.