

Monitoreo de variables climáticas en agricultura con redes lora: contraste entre soluciones homologadas y bajo costo

Climate variable monitoring in agriculture with lora networks: contrast between certified and low-cost solutions

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20291384>

AUTORES: E. Fabián Rivera¹

Henry Vallejo²

Yair Sacan³

Pablo Salazar⁴

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: edgar.rivera@ueb.edu.ec

Fecha de recepción: 14 / 10 / 2025

Fecha de aceptación: 08 / 12 / 2025

RESUMEN

El presente artículo evidencia una revisión comparativa de redes LoRa utilizadas para el monitoreo de variables climáticas aplicado en contextos agrícolas, a fin de diferenciar e identificar parámetros de soluciones homologadas y de bajo costo. Para el estudio se llevó a cabo una búsqueda estructurada de la literatura en bases de datos científicas y repositorios abiertos seleccionando así quince artículos que implementan redes LoRa o LoRaWAN en aplicaciones de invernaderos, parcelas a cielo abierto y entornos altoandinos; es estudio

¹ <https://orcid.org/0000-0002-2612-4760>, Universidad Estatal de Bolívar, edgar.rivera@ueb.edu.ec

² <https://orcid.org/0000-0002-3604-5572>, Universidad Estatal de Bolívar, hvallejo@ueb.edu.ec

³ <https://orcid.org/0009-0000-5472-175X>, Universidad Estatal de Bolívar, yahir.sacan@ueb.edu.ec

⁴ <https://orcid.org/0009-0003-2371-3775>, Universidad Estatal de Bolívar, pablo.salazar@ueb.edu.ec

toma en consideración criterios explícitos de inclusión y exclusión. En el estudio se analizaron parámetros técnicos en base a datos obtenidos sobre el tipo de red, la configuración de hardware y arquitectura de comunicación, las variables climáticas monitoreadas, las métricas de desempeño y la información disponible sobre costos. Los resultados de la presente investigación muestran una clara predominancia de redes de bajo costo basadas en microcontroladores de propósito general y módulos LoRa genéricos; las redes de bajo costo lograron desempeños comparables a las soluciones homologadas en distancias cortas y entornos controlado; pero presentan mayor variabilidad en PDR y calidad de enlace a medida que aumentan el alcance y la complejidad del terreno. Las redes homologadas, aunque menos frecuentes exhiben mayor estabilidad en las métricas de comunicación, mejor documentación energética y mayor robustez mecánica; esto tomando en consideración un incremento significativo en la inversión inicial. Se concluye que las redes de bajo costo constituyen una alternativa viable para proyectos piloto y contextos de recursos limitados; mientras que las soluciones homologadas resultan más adecuadas cuando se requiere alta confiabilidad y operación continua en sistemas agrícolas críticos.

Palabras Clave: Agricultura inteligente, LoRa, Monitoreo climático, Redes de bajo costo, Variables agrometeorológicas.

ABSTRACT

This work presents a comparative review of LoRa networks used for monitoring climate and soil variables in agricultural contexts, differentiating between certified and low-cost solutions. A structured search of recent literature was carried out in scientific databases and open repositories, selecting fifteen articles that implement LoRa or LoRaWAN networks in greenhouses, open-field plots, and high Andean environments, according to explicit inclusion and exclusion criteria. For each study, the type of network, hardware configuration and communication architecture, monitored climate variables, performance metrics, and available cost information were analyzed. The results show a clear predominance of low-cost networks based on general-purpose microcontrollers and generic LoRa modules, which achieve performance comparable to certified solutions at short distances and in controlled environments, but exhibit greater variability in PDR and link quality as range and terrain complexity increase. Certified networks, although less frequent,

display greater stability in communication metrics, better energy documentation, and higher mechanical robustness, at the expense of a significant increase in initial investment. It is concluded that low-cost networks constitute a viable alternative for pilot projects and resource-constrained contexts, whereas certified solutions are more suitable when high reliability and continuous operation are required in critical agricultural systems.

Keywords: Smart agriculture, LoRa, Climate monitoring, Low-cost networks, Agrometeorological variables.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática y la creciente frecuencia de eventos extremos están poniendo a prueba la resiliencia de los sistemas agrícolas, especialmente en territorios rurales y de pequeña escala donde las pérdidas por heladas, sequías o lluvias intensas se traducen en afectaciones directas a la seguridad alimentaria y a la economía local (Assad et al., 2022). Para anticipar estos impactos es indispensable contar con redes de monitoreo que capturen en tiempo real variables como temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y humedad del suelo, permitiendo tomar decisiones oportunas sobre riego, ventilación de invernaderos o protección de cultivos. Es así como, las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) sustentadas en redes de baja potencia y largo alcance, como LoRa y LoRaWAN, se han consolidado como una alternativa promisorio frente a soluciones cableadas o basadas en redes celulares convencionales, por su bajo consumo energético, gran alcance y operación en bandas de frecuencia no licenciadas (Muslim et al., 2021).

Diversos trabajos enfocados al estudio de redes han demostrado el potencial de LoRa/LoRaWAN para el monitoreo ambiental y agrícola; se han desarrollado redes para invernaderos inteligentes, capaces de registrar la variabilidad espacial de temperatura, humedad y CO₂ con bajas tasas de pérdida de paquetes y amplia cobertura a nivel de parcela o explotación agrícola; otras propuestas han integrado estas redes con plataformas web y servicios en la nube para visualizar y analizar datos en tiempo real (Križanović et al., 2023). Asimismo, se han reportado sistemas de riego inteligente en olivares, redes de monitoreo para explotaciones agrícolas comerciales y soluciones de calidad de agua

basadas en LoRa, que confirman la madurez de esta tecnología para aplicaciones de monitoreo distribuido en entornos rurales y sobre todo agrícolas. Paralelamente, revisiones recientes resaltan la importancia de estaciones agrometeorológicas de bajo costo y nodos IoT para apoyar la agricultura climáticamente inteligente, subrayando su potencial para complementar o densificar las redes meteorológicas convencionales (Faid et al., 2022).

El éxito tecnológico de implementar redes de bajo costo subyace una tensión práctica; por un lado, existen soluciones homologadas o comerciales mediante gateways y nodos certificados con cumplimiento explícito de normativas de telecomunicaciones y estándares industriales que ofrecen robustez, soporte técnico y garantías; pero implican inversiones iniciales y costos operativos elevados para instituciones educativas, pequeñas cooperativas o agricultores familiares (Harinda et al., 2022). Por otro lado, para el análisis y como respuesta a los altos costos de dispositivos homologados han surgido arquitecturas de bajo costo basadas en microcontroladores de uso general tales como: ESP32 o Arduino, módulos LoRa genéricos y sensores económicos, que reducen significativamente el CAPEX y facilitan la apropiación tecnológica, pero plantean interrogantes sobre la confiabilidad a largo plazo, la calidad de los datos, la gestión de la energía y el grado de cumplimiento normativo efectivo (Wu & Liebeherr, 2023).

La literatura recoge varios prototipos y pilotos de redes LoRa de bajo costo para agricultura de precisión y monitoreo ambiental, pero son menos frecuentes los estudios que comparen de forma sistemática soluciones de bajo costo frente a redes LoRa homologadas, bajo condiciones de campo equivalentes y con métricas cuantitativas de desempeño como cobertura efectiva, RSSI/SNR, tasa de entrega de paquetes, consumo energético, disponibilidad del servicio, escalabilidad; junto con un análisis económico integral. Esta brecha es especialmente relevante en contextos donde los recursos financieros son limitados como es el caso de comunidades indígenas donde es primordial la necesidad de información climática a fin de prevenir daños en invernaderos y cultivos; mismos que son el sustento diario de las comunidades.

En tenor a lo descrito anteriormente, el propósito del presente busca ofrecer evidencia concreta que ayude a elegir con criterio qué tipo de red LoRa conviene implementar para el

monitoreo climático en explotaciones agrícolas pequeñas y medianas. Para ello, se realiza una comparación entre estudios que utilizan redes LoRa homologadas y redes LoRa de bajo costo, analizando cómo se comportan cuando se enfrentan a un conjunto similar de variables climáticas y condiciones reales de operación. Esta comparación se aborda desde dos miradas complementarias: por un lado, la dimensión técnico–operativa y, por otro, la dimensión económico–institucional. Por ende, el objetivo central del estudio es contrastar el rendimiento, la calidad del servicio y los costos de implementación y operación de una red LoRa homologada frente a una red LoRa de bajo costo para el monitoreo de variables climáticas en entornos agrícolas, identificando los compromisos, ventajas y oportunidades que cada enfoque ofrece para su adopción sostenible en contextos de restricción presupuestaria.

METODOLOGÍA

Esta investigación emplea una metodología de revisión comparativa con enfoque descriptivo-analítico para contrastar el desempeño de redes LoRa homologadas frente a soluciones de bajo costo en el monitoreo agroclimático. El estudio se basa en la sistematización de literatura científica reciente (últimos 5 a 7 años) indexada en bases de datos como IEEE Xplore, Scopus y Web of Science, centrándose en la medición de variables críticas como temperatura, humedad, radiación y precipitación. La selección de fuentes se rigió por criterios estrictos de inclusión, priorizando trabajos con validación en campo que reportaran métricas cuantitativas de red —tales como RSSI, SNR, tasa de entrega de paquetes y consumo energético—, excluyendo simulaciones teóricas o prototipos sin datos de desempeño claros para garantizar una comparativa técnica sólida entre hardware certificado y desarrollos de bajo costo.

Con el fin de establecer una comparación consistente, se operacionalizaron las categorías de análisis como se evidencia en la Tabla 1.

Tabla 1. *Análisis de los estudios en las diferentes categorías*

Categoría	Variable	Unidad típica	Descripción breve
Clasificación	Tipo de red	—	Red LoRa homologada mediante equipos certificados, soporte industrial o red LoRa de bajo costo como MCU + módulos LoRa genéricos).
Topología	Número de nodos	---	Cantidad de nodos sensores desplegados en cada estudio.
Infraestructura	Tipo de gateway	—	Tipo de gateway utilizado: comercial/homologado o genérico/DIY.
Radiofrecuencia	Frecuencia de operación	MHz	Frecuencia de operación de LoRa según banda regional.
Radiofrecuencia	Potencia de transmisión	dBm	Potencia de emisión configurada en los nodos de la red.
Adquisición de datos	Intervalo de muestreo	min	Tiempo entre mediciones/envíos de datos desde cada nodo.
Desempeño de red	Alcance reportado	m, km	Distancia efectiva de comunicación lograda en las pruebas de campo.
Desempeño de red	Tasa de entrega de paquetes	%	Porcentaje de paquetes recibidos correctamente (PDR) respecto a los enviados.
Desempeño de red	RSSI promedio	dBm	Valor promedio del indicador de intensidad de señal recibida.
Desempeño de red	SNR promedio	dB	Valor promedio de la relación señal-ruido en el enlace LoRa.
Energía	Consumo energético / autonomía	mA, mAh o Wh	Consumo de energía estimado o medido y/o autonomía de los nodos.
Variables medidas	Variables climáticas monitoreadas	Según variable	Tipo de variables climáticas medidas
Escenario	Contexto de despliegue	—	Entorno donde se instaló la red: invernadero, parcela abierta, entorno urbano o rural.

RESULTADOS

La presente Sección presenta los resultados de la revisión comparativa de los 15 estudios seleccionados sobre redes LoRa y LoRaWAN aplicadas al monitoreo de variables climáticas y edáficas en contextos agrícolas. En primer lugar, se caracteriza de manera general el conjunto de trabajos analizados, atendiendo a su distribución temporal y geográfica, al tipo de entorno de despliegue y a la clasificación de las redes en homologadas o de bajo costo. A partir de esta base descriptiva, se profundiza posteriormente en el desempeño técnico, los aspectos energéticos y las implicaciones económicas de ambos enfoques, a fin de sustentar una discusión crítica sobre su pertinencia y viabilidad en escenarios agrícolas con recursos limitados.

En total de artículos analizados se trata de trabajos publicados mayoritariamente en los últimos años, en consonancia con la madurez reciente de las tecnologías LPWAN en agricultura de precisión. La muestra presenta una amplia diversidad geográfica, con estudios realizados en Europa (España, Portugal, Chipre, Grecia, Turquía), América Latina (Brasil, Colombia, Ecuador, Perú), Asia (República de Corea, India, Indonesia), África (Tanzania, Marruecos) y Oceanía (Australia), lo que permite abarcar desde climas templados y mediterráneos hasta zonas tropicales y altoandinas.

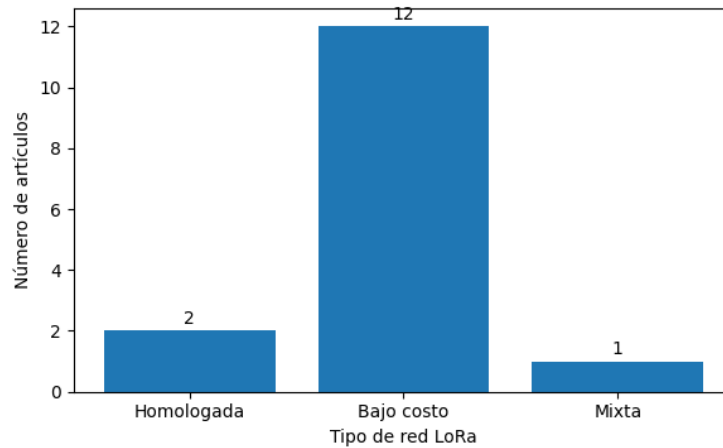
Los estudios presentan diversos tipos de entorno de despliegue, en donde la mayoría de las soluciones se implementaron en parcelas a cielo abierto, incluyendo viñedos, olivares y parcelas agrícolas de gran extensión. Un segundo grupo importante corresponde a invernaderos o multi-invernaderos, generalmente asociados a escenarios de agricultura intensiva y control ambiental. También se identificaron estudios en entornos o mixtos urbanos–rurales, orientados a validaciones experimentales o prototipos de precisión agrícola, así como aplicaciones en zonas altoandinas, caracterizadas por grandes altitudes y condiciones climáticas extremas, y un caso adicional en entorno rural abierto. Esta variedad de escenarios aporta evidencia sobre el comportamiento de las redes LoRa en contextos topográficos y de propagación muy diferentes.

A. Configuración de hardware y arquitectura de red

En los estudios analizados se observa una marcada preferencia por arquitecturas de red sencillas y robustas, basadas casi siempre en una topología en estrella donde uno o pocos gateways concentran la información proveniente de múltiples nodos sensores distribuidos en invernaderos o parcelas agrícolas entre ellos destacan (Anastasiou et al., 2023; Ramson et al., 2022; Valente et al., 2022). Las redes clasificadas como homologadas se apoyan principalmente en gateways comerciales LoRaWAN frecuentemente diseñados para uso industrial y con carcasas de grado IP, soporte de múltiples canales y sincronización por GPS; mientras que las redes de bajo costo recurren a gateways basados en placas de cómputo embebido; ya sea mediante Raspberry Pi combinadas con concentradores LoRa genéricos o shields específicos (Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, 2024). En ambos casos, la pasarela suele integrarse con un servidor de aplicaciones remoto mediante Ethernet o Wi-Fi y, en algunos estudios, con plataformas públicas o privadas de IoT.

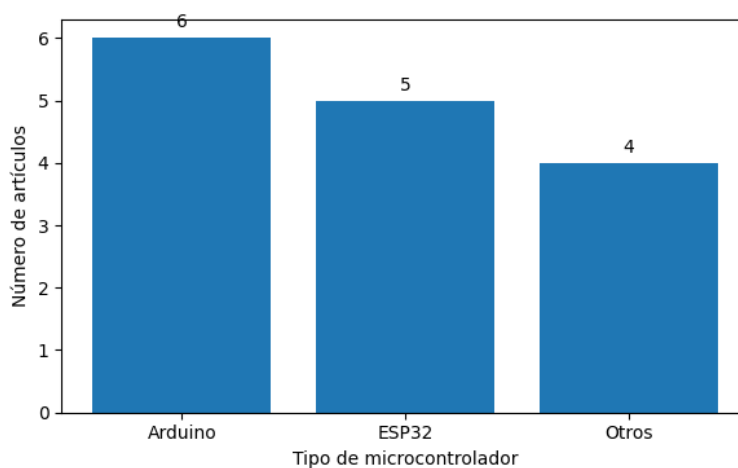
La Figura 1 resume la distribución de los estudios según el tipo de red implementada, diferenciando entre redes LoRa homologadas, soluciones de bajo costo y enfoques mixtos. Como se observa, la mayoría de trabajos se orienta hacia arquitecturas de bajo costo, mientras que un número reducido de estudios emplea exclusivamente hardware homologado, lo que refuerza la tendencia de la literatura reciente a experimentar con plataformas abiertas y componentes económicos en el ámbito del monitoreo climático agrícola.

Figura 1. *Distribución de los estudios según el tipo de red LoRa*



Las soluciones de bajo costo están dominadas por microcontroladores de propósito general como Arduino, ESP32 o placas integradas del tipo TTGO LoRa, acoplados a transceptores LoRa de la familia SX127x y a sensores económicos de temperatura, humedad, presión, radiación o humedad del suelo (Ahmed et al., 2022; Lopez, 2025). Las redes homologadas, en cambio, emplean nodos comerciales o módulos industriales pre-certificados, con mayor integración de hardware, mejores especificaciones de robustez mecánica y eléctrica, y en algunos casos capacidades de autodiagnóstico y actualización remota de firmware (Harinda et al., 2022; Wu & Liebeherr, 2023). Esta diferencia en el diseño de los nodos se traduce en un equilibrio distinto entre costo, facilidad de mantenimiento y expectativa de vida útil en campo (Rivera Guzmán et al., 2022).

Figura 2. Distribución de los estudios según el tipo de microcontrolador



Varios de los trabajos revisados utilizan bandas sub-GHz típicas para LoRa, principalmente 868 MHz en Europa y entornos mediterráneos, y 915 MHz en América y algunas regiones de Asia y Oceanía (Quete et al., 2020; Singh et al., 2022). La potencia de transmisión se sitúa habitualmente entre 14 y 20 dBm, respetando los límites regulatorios de cada región, mientras que el spreading factor (SF) se ajusta entre SF7 y SF12 según el compromiso deseado entre alcance y tasa de datos (Dwi Putra et al., 2021; Mezouari et al., 2023). Cuando se implementa LoRaWAN, los estudios suelen adherirse a anchos de banda de 125 kHz y a las clases A o C de dispositivo; en contraste, varias propuestas de bajo costo optan por enlaces punto a punto o star-of-stars con protocolos de aplicación propietarios sobre la capa física LoRa (Cumming & Branch, 2023).

Al analizar la gestión energética y la infraestructura de soporte, la mayoría de los nodos en campo se alimenta mediante baterías recargables combinadas con paneles solares, lo que permite autonomías de semanas o meses bajo regímenes de muestreo moderados (Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, 2024; L. Mathew & Ally Dida, 2022). Las soluciones homologadas tienden a ofrecer una caracterización energética más detallada y esquemas de protección frente a sobretensiones y condiciones ambientales adversas, mientras que las propuestas de bajo costo, si bien reducen significativamente el costo por nodo, dependen en mayor medida de un diseño cuidadoso del duty cycle y de estrategias de suspensión profunda del microcontrolador para garantizar autonomías aceptables.

B. Variables climáticas y de suelo monitoreadas

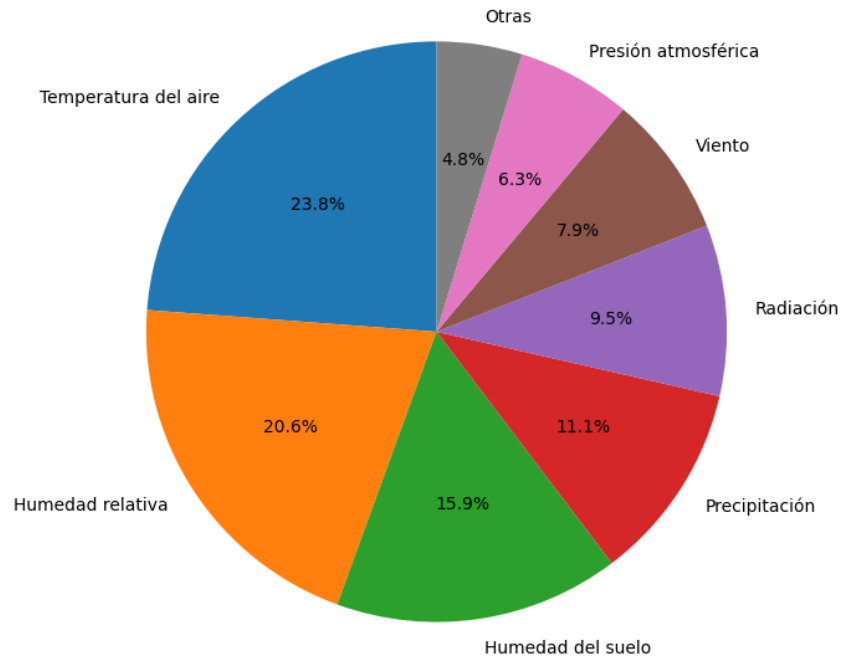
La revisión muestra un núcleo común de variables climáticas monitoreadas sobre el cual se van añadiendo otros parámetros según el contexto y la complejidad de la aplicación. Prácticamente todos los trabajos registran la temperatura del aire como variable básica, usualmente acompañada de la humedad relativa, dado su papel central en la caracterización del microclima de invernaderos y parcelas abiertas (Ahmed et al., 2022; Lopez, 2025). A este núcleo se añaden con frecuencia la humedad del suelo, medida mediante sensores capacitivos o resistivos, y en menor proporción variables como la radiación solar o

luminosa, la presión atmosférica y la precipitación, que permiten una descripción más completa del entorno agroclimático (Anastasiou et al., 2023; Dwi Putra et al., 2021). En algunos casos específicos también se incluyen parámetros adicionales, como la velocidad y dirección del viento o concentraciones de CO₂, cuando el objetivo es optimizar ventilación, riego o condiciones de crecimiento en invernaderos de alta intensidad (Singh et al., 2022).

Al analizar las diferentes configuraciones planteadas en los estudios, se observa que tanto las soluciones homologadas como las de bajo costo tienden a cubrir el mismo conjunto de variables fundamentales, si bien las primeras suelen integrar sensores de mayor calidad metrológica o con certificaciones específicas (Faid et al., 2022). Las redes de bajo costo, por su parte, priorizan combinaciones de sensores ampliamente disponibles y económicos, centradas en temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, complementadas ocasionalmente con radiación, lluvia o presión, en función del presupuesto y de las necesidades del caso de estudio (Botero-Valencia et al., 2022). Esto indica que las diferencias entre ambos enfoques no radican tanto en el tipo de variable climática monitoreada; mismo que es en general comparable como en la precisión esperable, la robustez del sensor y el nivel de integración con otros subsistemas de gestión agronómica.

La Figura 3 muestra la distribución de las variables climáticas y de suelo monitoreadas en los estudios analizados. Se observa que la temperatura del aire y la humedad relativa están presentes en la mayoría de las implementaciones, mientras que variables como radiación, viento, presión atmosférica u otros parámetros específicos aparecen con menor frecuencia.

Figura. 3. *Variables climáticas monitoreadas*



C. Desempeño de redes LoRa homologadas

En los estudios que emplean redes LoRa homologadas, el desempeño de la comunicación suele caracterizarse por tasas de entrega de paquetes elevadas, con valores reportados que se mantienen de forma consistente en rangos altos incluso en escenarios de mayor distancia o con cierta obstrucción del enlace (Valente et al., 2022). En estos trabajos, la combinación de gateways comerciales multicanal con nodos certificados permite sostener RSSI y SNR más estables, con menor dispersión entre mediciones y una sensibilidad radio optimizada para entornos agrícolas exigentes. Además, cuando se exploran distintos parámetros de configuración, las redes homologadas tienden a mantener un comportamiento predecible, lo que facilita la planificación de la cobertura y la densidad de nodos requerida para monitorear invernaderos o parcelas extensas.

Otro rasgo común es la integración más cuidada de la gestión energética, aunque el consumo puede ser comparable al de soluciones de bajo costo, varios trabajos con hardware homologado incluyen caracterizaciones detalladas de la autonomía, curvas de descarga y estrategias de gestión de energía (Anastasiou et al., 2023; Dafonte, J., González, M. Á.,

Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, 2024) En consecuencia, las estimaciones de tiempo de operación sin mantenimiento (semanas o meses) se apoyan en datos medidos y no solo en cálculos teóricos. Todo ello se traduce en un nivel de confiabilidad que, si bien implica una inversión inicial mayor en nodos y gateways, ofrece a cambio una mayor robustez y previsibilidad del servicio, aspectos especialmente relevantes cuando el monitoreo climático se integra en sistemas de riego o control automático de invernaderos.

D. Desempeño de redes LoRa de bajo costo

Las redes LoRa de bajo costo muestran un desempeño más heterogéneo, condicionado tanto por la calidad de los componentes utilizados como por el entorno de despliegue (Rivera Guzmán et al., 2022). En distancias cortas o en invernaderos con línea de vista razonable, varios estudios reportan tasas de entrega de paquetes comparables a las soluciones homologadas, con PDR elevadas y valores de RSSI y SNR dentro de rangos aceptables para el monitoreo continuo de temperatura, humedad y humedad del suelo (Dwi Putra et al., 2021). Sin embargo, al incrementar la distancia, la densidad de obstáculos o la complejidad del relieve —como ocurre en zonas altoandinas o parcelas muy extensas— se observan con mayor frecuencia caídas en la PDR, mayor variabilidad en RSSI/SNR y, en algunos casos, la necesidad de ajustar manualmente parámetros como el spreading factor o la potencia de transmisión para sostener la comunicación.

Pese a estas limitaciones, las soluciones de bajo costo ofrecen ventajas relevantes: permiten desplegar un mayor número de nodos por unidad de presupuesto, lo que mejora la resolución espacial del monitoreo, y son suficientemente flexibles como para adaptarse a distintos esquemas de muestreo y a topologías experimentales. No obstante, la caracterización energética suele ser menos exhaustiva y la autonomía de los nodos depende en gran medida de un diseño cuidadoso del duty cycle y de la correcta implementación de modos de bajo consumo en los microcontroladores (Cumming & Branch, 2023; Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, 2024). En resumen, las redes LoRa de bajo costo pueden alcanzar desempeños muy satisfactorios en contextos controlados o de mediana escala, pero su fiabilidad a larga distancia y en condiciones

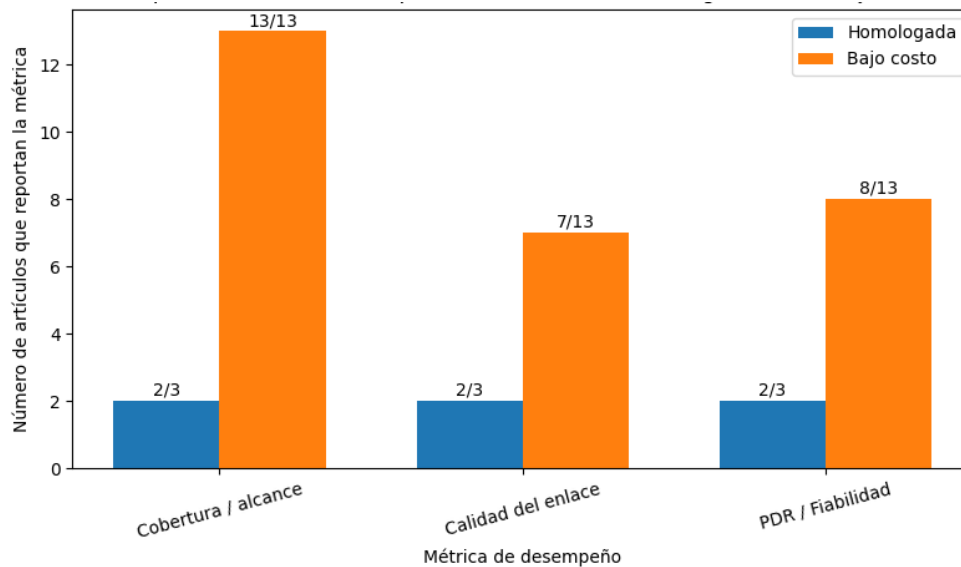
ambientales adversas tiende a ser más sensible a las decisiones de diseño y al mantenimiento que requieren en campo.

E. Comparación sintética entre redes homologadas y de bajo costo

Las soluciones homologadas se apoyan en hardware certificado, gateways industriales y sensores con mejores especificaciones, lo que se traduce en enlaces más estables, menos pérdida de paquetes y una documentación técnica más sólida, especialmente en lo que respecta al consumo energético y a la protección frente a condiciones ambientales adversas. Son redes pensadas para “instalar y confiar”, con ciclos de vida más largos y mayor previsibilidad, pero a cambio requieren inversiones iniciales que no siempre están al alcance de pequeños productores, instituciones educativas o proyectos piloto con presupuestos ajustados.

Las redes de bajo costo, en cambio, representan una apuesta por la accesibilidad y la flexibilidad. Suelen construirse con microcontroladores de propósito general, módulos LoRa económicos y sensores de precio moderado, lo que permite desplegar más nodos por el mismo dinero y aumentar la resolución espacial del monitoreo. Sin embargo, ese ahorro viene acompañado de ciertos compromisos: mayor variabilidad en la calidad del enlace, necesidad de ajustar parámetros “a mano” y una dependencia fuerte de un buen diseño del consumo energético y del mantenimiento en campo. En síntesis, mientras las redes homologadas ofrecen robustez y confiabilidad para escenarios donde el fallo no es una opción, las redes de bajo costo abren la puerta a experimentar, aprender y escalar soluciones en contextos de recursos limitados, siempre que se asuma de forma consciente el equilibrio entre costo, esfuerzo de operación y calidad del servicio.

La Figura 4 compara el número de estudios que reportan explícitamente la cobertura/alcance, la calidad del enlace y la fiabilidad de la transmisión para redes LoRa homologadas y de bajo costo. Se observa que, aunque la proporción de trabajos con redes de bajo costo es mayor, el nivel de detalle en las métricas de desempeño tiende a ser más consistente en los estudios basados en hardware homologado.

Figura. 4. Métricas redes LoRa homologadas vs de bajo costo

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión comparativa subrayan una dicotomía fundamental en la adopción de tecnologías IoT para el agro: la fiabilidad frente a la accesibilidad. Al contrastar el desempeño de las redes LoRa, se observa que las soluciones homologadas, respaldadas por hardware industrial, ofrecen una estabilidad superior en métricas críticas como la Tasa de Entrega de Paquetes (PDR) y el Índice de Intensidad de Señal Recibida (RSSI). Tal como sostienen Valente et al. (2022), la robustez de los gateways comerciales multicanal minimiza la pérdida de datos incluso en condiciones de obstrucción severa, lo cual es vital cuando la información climática activa sistemas automáticos de riego o alertas de heladas. Sin embargo, esta confiabilidad técnica tiene un costo económico que, según Harinda et al. (2022), puede actuar como una barrera de entrada infranqueable para la agricultura de pequeña escala o comunidades rurales con presupuestos limitados.

Por otro lado, la proliferación de soluciones de bajo costo basadas en arquitecturas como ESP32 y Arduino ha democratizado el acceso al monitoreo ambiental. Aunque estas redes presentan una mayor variabilidad en la relación señal-ruido (SNR) y mayor sensibilidad a la topografía, su capacidad para aumentar la resolución espacial es innegable. Botero-Valencia et al. (2022) demuestran que, por el costo de un solo nodo homologado, es posible

desplegar múltiples nodos económicos, permitiendo capturar microclimas dentro de una misma parcela que un sistema centralizado podría ignorar. No obstante, esta ventaja se ve condicionada por lo que Wu y Liebeherr (2023) identifican como el "costo oculto" del mantenimiento: la necesidad de una gestión energética manual más intensiva y el ajuste constante de parámetros de transmisión para compensar la falta de optimización del hardware genérico.

Un punto de convergencia relevante es la gestión energética. Mientras que las redes homologadas ofrecen una integración "instalar y confiar" con sistemas solares optimizados, las redes de bajo costo dependen críticamente del diseño del *duty cycle*. En contextos como las zonas altoandinas descritos por Lopez (2025) y Rivera Guzmán et al. (2022), las condiciones extremas de temperatura y radiación ponen a prueba la durabilidad de los componentes económicos, sugiriendo que el ahorro inicial en CAPEX podría diluirse en OPEX debido a reemplazos frecuentes. Esta realidad refuerza el argumento de Faid et al. (2022) sobre la necesidad de avanzar hacia estaciones agrometeorológicas que, aunque sean de bajo costo, incorporen principios de diseño "inteligente" para garantizar la sostenibilidad operativa.

Finalmente, la elección entre una red homologada o una de bajo costo no debe ser vista como una decisión puramente técnica, sino como un compromiso institucional. Para explotaciones comerciales de alta rentabilidad, la robustez de soluciones como las analizadas por Ahmed et al. (2022) es indispensable. Sin embargo, para la agricultura familiar y comunidades indígenas, donde la resiliencia climática es una cuestión de subsistencia, las redes de bajo costo representan no solo una herramienta tecnológica, sino un vehículo de apropiación del conocimiento. En conclusión, la integración de redes LoRa en el sector agrícola debe priorizar un enfoque híbrido que combine la precisión de sensores certificados con la flexibilidad de arquitecturas abiertas, logrando así un equilibrio que favorezca la seguridad alimentaria sin comprometer la viabilidad económica del productor.

CONCLUSIONES

La revisión de los 15 estudios muestra que ambos enfoques permiten monitorear eficazmente variables clave como temperatura del aire, humedad relativa, humedad del suelo, precipitación y, en algunos casos, radiación y viento. Sin embargo, las soluciones homologadas tienden a ofrecer tasas de entrega de paquetes más estables, valores de RSSI y SNR menos variables, mejor protección mecánica y eléctrica, y una gestión energética mejor caracterizada, lo que se traduce en una mayor confiabilidad del servicio a mediano y largo plazo. Las redes de bajo costo, aunque pueden igualar el desempeño en distancias cortas y entornos controlados, muestran una mayor sensibilidad a la topografía, los obstáculos y la calidad del diseño, especialmente en escenarios de larga distancia o condiciones ambientales adversas.

La predominancia de soluciones low-cost en la literatura analizada evidencia una clara tendencia a democratizar el monitoreo climático mediante microcontroladores de propósito general y módulos LoRa económicos. Esto permite desplegar un mayor número de nodos por unidad de presupuesto y mejorar la resolución espacial de la información, aspecto crítico para decisiones de riego y manejo de invernaderos. No obstante, el menor grado de certificación, la variabilidad del desempeño radio y la caracterización energética incompleta indican que su adopción debe ir acompañada de buenas prácticas de diseño (elección de antenas, configuración del duty cycle, protección ambiental) y de una evaluación realista de los compromisos entre costo, mantenimiento y fiabilidad, especialmente cuando los datos se integran en sistemas de decisión operativa.

A partir de los vacíos identificados en la revisión, se plantean varias líneas de trabajo futuro. En primer lugar, son necesarios estudios experimentales comparativos en un mismo escenario de campo, donde redes homologadas y de bajo costo se desplieguen en paralelo con idéntica configuración de variables y topología, lo que permitiría cuantificar de manera más precisa las diferencias en PDR, RSSI, SNR, autonomía y esfuerzo de mantenimiento. En segundo lugar, se requieren análisis económico-operativos más detallados, que incluyan no solo el costo de adquisición de nodos y *gateways*, sino también costos de instalación, reposición, soporte técnico y formación de usuarios, para construir modelos de decisión

adaptados a pequeñas y medianas explotaciones agrícolas. Finalmente, resulta pertinente avanzar hacia arquitecturas híbridas, que combinen *gateways* homologados con nodos de bajo costo y esquemas de estandarización de métricas y protocolos, de modo que se pueda lograr un equilibrio sostenible entre confiabilidad, escalabilidad y accesibilidad económica en el monitoreo climático agrícola.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, M. A., Gallardo, J. L., Zuniga, M. D., Pedraza, M. A., Carvajal, G., Jara, N., & Carvajal, R. (2022). LoRa based IoT platform for remote monitoring of large-scale agriculture farms in Chile. *Sensors*, 22(8), Artículo 2824.
- Anastasiou, A., Zinonos, Z., & Georgiades, M. (2023). LoRa-based environmental monitoring system for commercial farming. En *Proceedings - 19th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT 2023)* (pp. 574-579). IEEE.
- Assad, E. D., Calmon, M., Lopes-Assad, M. L., Feltran-Barbieri, R., Pompeu, J., Domingues, L. M., & Nobre, C. A. (2022). Adaptation and resilience of agricultural systems to local climate change and extreme events: An integrative review. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 52, e72899.
- Botero-Valencia, J. S., Mejia-Herrera, M., & Pearce, J. M. (2022). Low cost climate station for smart agriculture applications with photovoltaic energy and wireless communication. *HardwareX*, 11, e00296.
- Cumming, S., & Branch, P. (2023). A LoRa-based monitoring system for agriculture. En *2023 33rd International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, J. J. (2024). Soil water status monitoring system with proximal low-cost sensing and LoRa transmission in vineyards. *Sensors*, 24(24), Artículo 8104.
- Dwi Putra, S., Olivia Sereati, C., & Sutrisno, H. (2021). Design of IoT monitoring system based on LoRaWAN architecture for smart green house. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1012(1), 012090.
- Faid, A., Sadik, M., & Sabir, E. (2022). An agile AI and IoT-augmented smart farming: A cost-effective cognitive weather station. *Agriculture*, 12(1), Artículo 35.

- Harinda, E., Wixted, A. J., Qureshi, A. U. H., Larijani, H., & Gibson, R. M. (2022). Performance of a live multi-gateway LoRaWAN and interference measurement across indoor and outdoor localities. *Computers*, 11(2), Artículo 25.
- Križanović, V., Grgić, K., Spišić, J., & Žagar, D. (2023). An advanced energy-efficient environmental monitoring in precision agriculture using LoRa-based wireless sensor networks. *Sensors*, 23(14), Artículo 6332.
- Mathew, L. G., & Dida, M. A. (2022). Agro-meteorological data collection using a LoRaWAN-based IoT sensor network. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 8(2), 15-24.
- Lopez, G. (2025). LoRaWAN-based system for multivariate data acquisition in high Andean agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 12, Artículo 101569.
- Mezouari, A., Elkarch, H., Haoul, C., Dahou, H., & Elgouri, R. (2023). LoraWAN-based intelligent multi-greenhouse monitoring and control. *E3S Web of Conferences*, 469, 00087.
- Muslim, M. A., Setyawan, R. A., Basuki, A., Razak, A. A., Hario, F. P., & Fernando, E. (2021). IOT based climate monitoring system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 746(1), 012044.
- Quete, B., Heideker, A., Zyrianoff, I., Ottolini, D., Kleinschmidt, J. H., Soininen, J. P., & Kamienski, C. (2020). Understanding the tradeoffs of LoRaWAN for IoT-based smart irrigation. En *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)* (pp. 272-277). IEEE.
- Ramson, S. R. J., Vishnu, S., Kirubaraj, A. A., Anagnostopoulos, T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2022). A LoRaWAN IoT-enabled trash bin level monitoring system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2), 1152-1160.
- Rivera Guzmán, E. F., Mañay Chochos, E. D., Chiliquinga Malliquinga, M. D., Baldeón Egas, P. F., & Toasa Guachi, R. M. (2022). LoRa network-based system for monitoring the agricultural sector in Andean areas: Case study Ecuador. *Sensors*, 22(18), Artículo 6743.
- Singh, D. K., Sobti, R., Jain, A., Malik, P. K., & Le, D. N. (2022). LoRa based intelligent soil and weather condition monitoring with internet of things for precision agriculture in smart cities. *IET Communications*, 16(5), 604-618.
- Valente, A., Costa, C., Pereira, L., Soares, B., Lima, J., & Soares, S. (2022). A LoRaWAN IoT system for smart agriculture for vine water status determination. *Agriculture*, 12(10), Artículo 1695.

Wu, D., & Liebeherr, J. (2023). A low-cost low-power LoRa mesh network for large-scale environmental sensing. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(19), 17084-17097.