**Sage Sphere Multidisciplinary Studies**

**ISSN: 3091-1672**

**Vol. 3 Núm. 1 (2026)**

EDITORIAL JOGB

**SSMS-Vol.3. N1. 108**

# Eficiencia energética en sistemas IoT sobre redes 5G: estudio comparativo por simulación de modos de ahorro de energía en tres escenarios de aplicación

## *Energy Efficiency in IoT Systems over 5G Networks: A Comparative Simulation Study of Power-Saving Modes in Three Application Scenarios*

**Autores:**

Juan Carlos Pisco Vanegas
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
jpisco@uteq.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-9624-7993

Diego Fernando Intriago Rodríguez
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
dintriagor3@uteq.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-4829-0089

Julius Manuel Vinueza Loor
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
jvinuezal2@uteq.edu.ec
https://orcid.org/0009-0006-2774-9937

Ángel Iván Torres Quijije
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
atorres@uteq.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-7037-7191

**Autor de correspondencia:** *Juan Carlos Pisco Vanegas*, jpisco@uteq.edu.ec

**Recepción:** 16-octubre-2025 **Aceptación:** 02-diciembre-2025 **Publicación:** 06-enero-2026

**Cómo citar este artículo:**
Pisco Vanegas, J. C., Intriago Rodríguez, D. F., Vinueza Loor, J. M., & Torres Quijije, Ángel I. (2026). Eficiencia energética en sistemas IoT sobre redes 5G: estudio comparativo por simulación de modos de ahorro de energía en tres escenarios de aplicación. *Sage Sphere Multidisciplinary Studies*, *3*(1), 1-6. https://doi.org/10.63688/1bh0k455

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.

**Sage Sphere Multidisciplinary Studies**

**ISSN: 3091-1672**

**Vol. 3 Núm. 1 (2026)**

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

## RESUMEN

**Introducción:** El despliegue masivo de dispositivos del Internet de las cosas (IoT) sobre redes 5G plantea retos energéticos, y faltan comparaciones reproducibles de los modos de ahorro entre dominios.

**Metodología:** Se simularon en MATLAB/GNU Octave tres escenarios (hogar inteligente, salud y agricultura), cada uno con 1 024 dispositivos RedCap distribuidos en ocho celdas NR de 3.5 GHz; cada celda es servida por un gNodeB con un arreglo de 128 antenas. La potencia del módem se modeló con 3GPP TR 38.840. El tráfico de hogar y salud se parametrizó con conjuntos de datos públicos, y el de agricultura con periodos supuestos. Se compararon una línea base y cuatro modos de ahorro con SNR de 20 dB y 40 dB, en 10 corridas (media ± DE).

**Resultados:** La suspensión logró la mayor reducción de energía (92.81 ± 0.20 %, 89.58 ± 0.26 % y 93.40 ± 0.35 % con SNR = 20 dB), con latencia media de 67 ms. La suspensión profunda se limitó a 59–76 % por el costo del establecimiento de conexión. En los perfiles evaluados, convino la suspensión profunda con periodos de 170 s o más, la suspensión entre 1.4 s y 60 s y la espera con periodos de 1 s o menos. Con el canal AWGN simplificado, la SNR alteró el consumo en menos de 0.1 %.

**Conclusiones:** En las condiciones del modelo, el modo óptimo dependió del periodo de transmisión y del presupuesto de latencia de cada clase, más que de la calidad del canal.

**Palabras clave:** Gestión energética; MIMO masivo; redes 5G; Internet de las cosas; simulación de redes.

## ABSTRACT

**Introduction:** The massive deployment of Internet of Things (IoT) devices over 5G networks raises energy-sustainability concerns, yet reproducible comparisons of power-saving modes across application domains remain scarce.

**Methodology:** Three scenarios (smart home, healthcare and agriculture) were simulated in MATLAB/GNU Octave, each with 1,024 RedCap devices distributed across eight 3.5 GHz NR cells, each cell served by a gNodeB with a 128-antenna array. The modem power model followed 3GPP TR 38.840. Smart-home and healthcare traffic was parameterized from public datasets, whereas agricultural traffic used assumed reporting periods. A baseline and four power-saving modes were compared at an SNR of 20 dB and 40 dB over 10 runs (mean ± SD).

**Results:** Sleep achieved the largest energy reduction (92.81 ± 0.20%, 89.58 ± 0.26% and 93.40 ± 0.35% at SNR = 20 dB) with a mean latency of 67 ms. Deep sleep was limited to 59–76% by the cost of connection setup. For the evaluated profiles, deep sleep suited periods of 170 s or more, sleep suited periods between 1.4 s and 60 s, and standby suited periods of 1 s or less. Under the simplified AWGN channel, SNR changed consumption by less than 0.1%.

**Conclusions:** Under the modeled conditions, the optimal mode depended on the reporting period and latency budget of each device class rather than on channel quality.

**Keywords:** Energy management; Massive MIMO; 5G networks; Internet of Things; network simulation.

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

## 1. INTRODUCCIÓN

La convergencia del Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y las redes móviles de quinta generación (5G) está transformando la infraestructura digital y habilita servicios masivos de tipo máquina en sectores como la salud, el hogar y la agricultura (Gkagkas et al., 2024; Sufyan et al., 2023). Esta expansión se traduce en una creciente demanda energética tanto en la red de acceso como en los terminales (Ezzeddine et al., 2024; López-Pérez et al., 2022), y la autonomía de los dispositivos depende críticamente del tiempo que sus módems permanecen en estados de alto consumo (3GPP, 2019; Lin et al., 2023).

La investigación sobre eficiencia energética (EE) en sistemas 5G ha abordado principalmente la red de acceso. López-Pérez et al. (2022) revisaron las técnicas de EE basadas en MIMO masivo, diseño de portadora ligera, modos de suspensión de estaciones base y aprendizaje automático; Piovesan et al. (2022) desarrollaron modelos analíticos y de aprendizaje automático del consumo de estaciones base 5G; Ezzeddine et al. (2024) sistematizaron los habilitadores verdes basados en inteligencia artificial; y Lorincz et al. (2022) analizaron la EE de datos y de cobertura en distintas áreas demográficas. En el contexto ecuatoriano, Espinal et al. (2025) analizaron la optimización del espectro radioeléctrico mediante tecnologías MIMO masivo en la banda de 3.5 GHz, configuración que sirve de base a la red simulada en este trabajo.

En el plano de los dispositivos, el 3GPP caracterizó el consumo del equipo de usuario NR por estados (transmisión, recepción, monitoreo de control y suspensión micro, ligera y profunda) (3GPP, 2019), y Lin et al. (2023) revisaron la evolución de la recepción discontinua (DRX) como mecanismo de ahorro desde LTE hasta 6G. Li et al. (2023) propusieron una estrategia de suspensión multinivel para la transmisión periódica en redes 5G privadas industriales, y Laidi et al. (2022) combinaron modelado de secuencias y aprendizaje por refuerzo para predecir lecturas de sensores y prolongar los periodos de inactividad. En dominios específicos, Osama et al. (2023) identificaron la limitación energética de los dispositivos del IoT médico como un desafío central de la Salud 4.0; y Dhanaraju et al. (2022), Pagano et al. (2023), Križanović et al. (2023) y Soussi et al. (2024) destacaron que la agricultura de precisión depende de sensores de bajo consumo con ciclos de trabajo reducidos.

Doi: https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Los modos de ahorro del dispositivo constituyen un complemento de bajo costo frente a las estrategias de red. No obstante, los estudios existentes se centran en la red de acceso o en un único dominio, y rara vez comparan varios modos bajo condiciones controladas y reproducibles con perfiles de tráfico obtenidos de conjuntos de datos reales (Li et al., 2023; Lin et al., 2023). Ecuador ofrece un contexto relevante, dado el avance en la asignación de espectro 5G y la política nacional de eficiencia energética.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es evaluar comparativamente, mediante simulación reproducible, el consumo energético del módulo de comunicación 5G de dispositivos IoT bajo cuatro modos de ahorro (inactivo, espera, suspensión y suspensión profunda) en los dominios de hogar inteligente, salud y agricultura inteligente. Las variables independientes son el modo, el escenario y la relación señal-ruido (SNR); las variables dependientes son la energía total, la energía de retransmisión, la energía por bit, la eficiencia energética, la tasa de error de bit (BER), la tasa de error de bloque (BLER), la pérdida residual de paquetes y la latencia. Se trata de un estudio cuantitativo, experimental por simulación y de alcance comparativo y descriptivo.

## 2. METODOLOGÍA

Se desarrolló un simulador de nivel de sistema en lenguaje MATLAB, sin toolboxes y compatible con GNU Octave; los resultados reportados se obtuvieron con GNU Octave 8.4.0. Se eligió este entorno frente a OMNeT++ y NS-3 porque el estudio requiere cálculo matricial del consumo por estados y modelado de capa física, mientras que esos simuladores están orientados a eventos discretos y a protocolos y requieren complementos para dichas funciones. La Tabla 1 reúne todos los parámetros. Como material suplementario se adjuntan el código de la simulación (sim_iot5g.m), el archivo de parámetros y semillas (parametros_simulacion.csv; semillas 1 a 10), los resultados de cada corrida (results_runs.csv y results_types.csv), la validación Monte Carlo de la BER (ber_montecarlo.csv), los perfiles de tráfico del hogar (home_profiles.json) y el script de análisis que genera las tablas y figuras (analyze.py).

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

**Tabla 1.**

*Parámetros de la simulación*

| Parámetro | Valor | Fundamento |
|---|---|---|
| ***Red y capa física*** | | |
| Celdas (un gNodeB por celda) × dispositivos | 8 × 128 (1 024 por escenario) | Diseño experimental |
| Arreglo de cada gNodeB | $M$ = 128 antenas Tx/Rx co-ubicadas | (Espinal et al., 2025; López-Pérez et al., 2022) |
| Dispositivos | RedCap, 1 antena, $K = 128 \leq M$ | (Espinal et al., 2025) |
| Portadora / ancho de banda | 3.5 GHz (n78); 100 MHz, $\mu$ = 1, 273 PRB | (Espinal et al., 2025; Sufyan et al., 2023) |
| Parte de ancho de banda del dispositivo | 20 MHz: 51 PRB (612 subportadoras) | Especificación RedCap (Rel. 17) |
| Ranura / símbolos de datos | 0.5 ms / 12 por ranura (2 DMRS) | Numerología NR, $\mu$ = 1 |
| SNR efectiva por usuario | 20 dB y 40 dB, canal AWGN | Diseño experimental |
| Modulación (adaptación de enlace) | 16-QAM (20 dB); 64-QAM (40 dB); Gray, sin codificación | Diseño experimental |
| Bloque de transporte (TBS) | 29 376 bits (16-QAM); 44 064 bits (64-QAM) | $612 \times 12 \times \log_2 M$ |
| HARQ | Máx. 4 transmisiones por bloque; RTT = 2 ms | Supuesto |
| Solicitud de planificación y concesión | 1 ms por paquete | Supuesto |
| ***Potencia del módem (unidades relativas TR 38.840; 1 u = 1 mW)*** | | |
| Transmisión UL (23 dBm) / recepción PDCCH+PDSCH | 700 mW / 300 mW | (3GPP, 2019) |
| Monitoreo de PDCCH (línea base) | 100 mW | (3GPP, 2019) |
| Suspensión micro / ligera / profunda | 45 / 20 / 1 mW | (3GPP, 2019) |
| Transición ligera / profunda | 100 µJ en 6 ms / 450 µJ en 20 ms | (3GPP, 2019) |
| ***Modos de ahorro*** | | |
| Inactivo | Suspensión micro (45 mW); reactivación < 1 ms | (3GPP, 2019) |
| Espera | Suspensión ligera (20 mW); reactivación U(6, 10) ms | (3GPP, 2019) |
| Suspensión | Profunda con paging cada 1.28 s (1.43 mW); reanudación U(30, 100) ms a 300 mW | (3GPP, 2019; Lin et al., 2023); supuesto |

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

| Parámetro | Valor | Fundamento |
|---|---|---|
| Suspensión profunda | Profunda sin paging (1 mW); conexión U(100, 500) ms a 300 mW | (3GPP, 2019; Lin et al., 2023); supuesto |
| ***Experimento*** | | |
| Duración y repeticiones | 3 600 s por corrida; semillas 1 a 10 | Diseño experimental |
| Variabilidad del tráfico | Tamaño y periodo ± 10 % (uniforme); fase aleatoria | Diseño experimental |

***Nota.*** U(*a*, *b*): distribución uniforme continua. Elaboración propia.

La configuración de red se basó en el estudio de MIMO masivo en la banda de 3.5 GHz de Espinal et al. (2025). Cada escenario de simulación comprende 1 024 dispositivos distribuidos en ocho celdas, y cada celda cuenta con su propio gNodeB, es decir, ocho gNodeB por escenario. Las 128 antenas de transmisión y recepción corresponden al arreglo co-ubicado en cada gNodeB ($M$ = 128), que atiende simultáneamente mediante multiplexación espacial a $K$ = 128 dispositivos de una sola antena por celda, de modo que se cumple la condición $K \leq M$ del MIMO masivo multiusuario (López-Pérez et al., 2022); por ello se supuso planificación sin colas. La portadora de 100 MHz en la banda n78 emplea la numerología $\mu$ = 1 (30 kHz, ranura de 0.5 ms, 273 bloques de recursos), y cada dispositivo de capacidad reducida (RedCap) opera en una parte de ancho de banda de 20 MHz con 51 bloques de recursos (612 subportadoras) (Sufyan et al., 2023).

El canal se modeló como ruido blanco gaussiano aditivo con SNR efectiva fija por usuario, entendida como la relación señal-ruido tras la combinación del arreglo. Dado que la SNR se fija directamente, el modelo no incorpora pérdida de trayecto, sombreado, multitrayecto ni interferencia, y las diferencias entre escenarios no se atribuyen a la distancia de propagación sino al perfil de tráfico de los dispositivos. Para cada SNR se aplicó adaptación de enlace (16-QAM con 20 dB y 64-QAM con 40 dB) con mapeo Gray y sin codificación de canal, de modo que la probabilidad de error de bit $p_b$ se calcula con la Ecuación (1) y la tasa de error de bloque con la Ecuación (2). La Ecuación (1) se validó mediante Monte Carlo con detección por decisión dura de mínima distancia: con 16-QAM y 20 dB se observaron 68 errores en $2 \times 10^7$ bits (BER = $3.40 \times 10^{-6}$, frente a $2.90 \times 10^{-6}$ analítica), y con 64-QAM y 40 dB no se observaron errores en $2.4 \times 10^7$ bits. La BLER resultante fue de 8.18 % con 20 dB. Con 40 dB no se observaron errores en las pruebas realizadas. Ese resultado no implica una probabilidad de error exactamente nula: con $2.4 \times 10^7$ bits sin errores,

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

la cota superior de la BER al 95 % de confianza (regla de tres) es de $1.25 \times 10^{-7}$, y la expresión analítica predice un valor mucho menor. Cada bloque erróneo se retransmite hasta un máximo de cuatro transmisiones, y el paquete se pierde si algún bloque falla en todas ellas. Los modos de ahorro no alteran la detección, ya que se supone sincronización completa tras cada reactivación.

$$p_{\mathrm{b}} \approx \frac{4}{log_2 M}\left(1-\frac{1}{\sqrt{M}}\right)\sum_{i=1}^{\sqrt{M}/2} Q\left((2i-1)\sqrt{\frac{3\cdot SNR}{M-1}}\right) \quad (1)$$

$$BLER = 1-(1-p_{\mathrm{b}})^{TBS} \quad (2)$$

**Tabla 2.**

*Perfiles de tráfico por clase de dispositivo*

| Clase | Dispositivo | Paquete IP (B) | Periodo (s) | Fuente del perfil |
|---|---|---|---|---|
| ***Hogar inteligente (UNSW-IoTraffic; Wannigama et al., 2025)*** | | | | |
| Enchufe | iHome Plug | 220 | 7.77 | (Wannigama et al., 2025) |
| Concentrador | SmartThings Hub | 77 | 5.07 | (Wannigama et al., 2025) |
| Cámara IP | Samsung SmartCam | 310 | 2.87 | (Wannigama et al., 2025) |
| Altavoz inteligente | Amazon Echo | 182 | 3.24 | (Wannigama et al., 2025) |
| Monitor de bebé | Withings Smart Baby Monitor | 45 | 1.37 | (Wannigama et al., 2025) |
| Sensor de sueño | Withings Aura | 166 | 7.21 | (Wannigama et al., 2025) |
| Altavoz inteligente | Triby Speaker | 297 | 23.81 | (Wannigama et al., 2025) |
| Marco de fotos | PIX-STAR Photo-frame | 163 | 193.76 | (Wannigama et al., 2025) |
| Cámara IP | Dropcam | 127 | 0.72 | (Wannigama et al., 2025) |
| Enchufe | TP-Link Smart Plug | 120 | 171.13 | (Wannigama et al., 2025) |

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

| Clase | Dispositivo | Paquete IP (B) | Periodo (s) | Fuente del perfil |
|---|---|---|---|---|
| Alarma de humo | NEST Protect | 956 | 23.97 | (Wannigama et al., 2025) |
| Cámara IP | Netatmo Welcome | 383 | 3.08 | (Wannigama et al., 2025) |
| Cámara día/noche | TP-Link Day Night Cloud Camera | 84 | 38.71 | (Wannigama et al., 2025) |
| ***Salud (UCI emulada de Hussain et al., 2021)*** | | | | |
| Humedad del aire | Emulado | 68 | 5 | (Hussain et al., 2021) |
| Temperatura del aire | Emulado | 71 | 5 | (Hussain et al., 2021) |
| CO | Emulado | 66 | 2 | (Hussain et al., 2021) |
| Incendio | Emulado | 65 | 2 | (Hussain et al., 2021) |
| Humo | Emulado | 66 | 2 | (Hussain et al., 2021) |
| Barómetro | Emulado | 70 | 5 | (Hussain et al., 2021) |
| Radiación solar | Emulado | 70 | 5 | (Hussain et al., 2021) |
| ECG | Emulado | 64 | 1 | (Hussain et al., 2021) |
| Bomba de infusión | Emulado | 72 | 600 | (Hussain et al., 2021) |
| $SpO_2$ | Emulado | 72 | 1 | (Hussain et al., 2021) |
| Flujo de aire | Emulado | 66 | 1 | (Hussain et al., 2021) |
| Presión arterial | Emulado | 73 | 2 | (Hussain et al., 2021) |
| GSR | Emulado | 63 | 300 | (Hussain et al., 2021) |
| ***Agricultura inteligente (Farm-Flow; Ferreira et al., 2025)*** | | | | |

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

| Clase | Dispositivo | Paquete IP (B) | Periodo (s) | Fuente del perfil |
|---|---|---|---|---|
| Sensor de suelo | Decagon 5TE | 100 | 900 | Supuesto |
| Sonda de suelo | Sentek Drill & Drop | 100 | 900 | Supuesto |
| Pasarela meteorológica | Davis Vantage Connect | 500 | 900 | Supuesto |
| Robot de cultivo | FarmBot Genesis | 1 000 | 60 | Supuesto |
| Robot agrícola | Hugo RT Gen. III | 1 000 | 1 | Supuesto |
| Robot UV | Luna TRIC | 1 000 | 1 | Supuesto |
| Controlador de riego | Orbit B-hyve | 300 | 300 | Supuesto |
| Controlador de riego | Netafim NMC Pro | 500 | 60 | Supuesto |

***Nota.*** En salud, el tamaño de paquete es la longitud media medida de los mensajes PUBLISH de MQTT del conjunto de datos, sin la cabecera Ethernet, y el periodo es el perfil temporal declarado por Hussain et al. (2021). Elaboración propia.

El tráfico de cada escenario se parametrizó por clase de dispositivo (Tabla 2), y cada celda se pobló con 128 dispositivos elegidos por muestreo aleatorio uniforme con reemplazo de la lista del escenario. En salud se utilizó el conjunto IoT Healthcare Security Dataset de Hussain et al. (2021), que emula una unidad de cuidados intensivos con sensores ambientales de la sala y sensores de monitoreo del paciente que publican mediante MQTT. De sus archivos de tráfico normal (31 758 registros de monitoreo ambiental y 76 810 de monitoreo del paciente; se excluyó el archivo de ataques) se seleccionaron los 88 752 mensajes PUBLISH, de los que se extrajeron la longitud de trama y el tópico. El tamaño de paquete por sensor se calculó como la longitud media de trama menos 14 bytes de cabecera Ethernet, y los periodos de publicación se tomaron de los perfiles temporales declarados por los autores. En el hogar inteligente se utilizó el conjunto UNSW-IoTraffic (Wannigama et al., 2025), que reúne 95.5 millones de paquetes de 27 dispositivos comerciales capturados durante 203 días. Para cada dispositivo, el tamaño medio de paquete se obtuvo dividiendo el volumen de su captura entre el número de paquetes y restando 30 bytes de cabeceras de registro y Ethernet, y el periodo medio dividiendo los días de captura entre el número de paquetes. Como las capturas incluyen ambos sentidos, modelar cada paquete como una transmisión ascendente constituye una cota conservadora. En agricultura, el conjunto Farm-Flow (Ferreira et al., 2025) (27 458 flujos de tráfico normal, recogidos de agosto a octubre de 2022) se empleó como referencia de la composición del tráfico, pero sus trazas no se procesaron directamente porque su

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

repositorio no fue accesible durante este estudio. Por ello, los periodos de los sensores (900 s), de los controladores (60 s y 300 s) y de la telemetría de los robots (1 s) son supuestos de modelado, coherentes con los ciclos de trabajo reducidos de la agricultura de precisión (Križanović et al., 2023; Pagano et al., 2023).

El consumo de los dispositivos se modeló únicamente para el módulo de comunicación 5G, porque los modos de ahorro actúan sobre el módem y la carga de la aplicación es independiente del modo. La potencia del módem se describe con el modelo de estados del 3GPP TR 38.840 (3GPP, 2019), que expresa la potencia de cada estado en unidades relativas. Para obtener valores energéticos se adoptó la escala 1 u = 1 mW; por tanto, las energías absolutas dependen de esta escala, mientras que las reducciones porcentuales son invariantes a ella. La energía total de cada dispositivo se descompone según la Ecuación (3): la energía de transmisión (Ecuación 4), la de recepción y control, la del reposo entre paquetes y la de reactivación.

$$E = E_{\text{tx}} + E_{\text{rx}} + E_{\text{rep}} + E_{\text{react}} \tag{3}$$

$$E_{\text{tx}} = N_{\text{TB}} \cdot T_{\text{slot}} \cdot P_{\text{UL}} \tag{4}$$

La línea base sin gestión energética mantiene el módem en monitoreo de PDCCH (100 mW) durante todo el tiempo entre paquetes. En los modos de ahorro, tras cada transmisión el dispositivo entra en el estado del modo si el intervalo libre hasta el siguiente paquete es al menos igual a la suma del tiempo de transición y la latencia de reactivación; en caso contrario, permanece en monitoreo. Los modos se definieron sobre los estados del TR 38.840 y los mecanismos DRX descritos por Lin et al. (2023): inactivo (suspensión micro), espera (suspensión ligera), suspensión (suspensión profunda con monitoreo de paging cada 1.28 s, equivalente a la reanudación desde RRC_INACTIVE) y suspensión profunda (sin paging, equivalente al establecimiento de conexión desde RRC_IDLE). En cada reactivación, la latencia se muestrea de una distribución uniforme dentro del intervalo del modo (Tabla 1), y durante la reanudación o el establecimiento de conexión el módem consume 300 mW. La latencia de cada paquete es la suma de la reactivación, la solicitud de planificación, las ranuras de transmisión y las rondas HARQ. La energía por bit y la eficiencia energética se definen en la Ecuación (5).

$$E_{\text{bit}} = \frac{E}{B_{\text{ok}}},\ \eta = \frac{B_{\text{ok}}}{E} \tag{5}$$

Doi: https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

Cada configuración (3 escenarios × 2 SNR × 5 modos) se ejecutó durante 3 600 s simulados con las semillas 1 a 10, y los cinco modos se evaluaron sobre la misma realización de tráfico y de errores en cada semilla (números aleatorios comunes). Los resultados se reportan como media ± desviación estándar (DE) de las 10 corridas. Como criterio de consistencia se exigió un coeficiente de variación de la energía total inferior a 10 %; el máximo observado fue de 6.6 %, en la suspensión profunda. No se aplicaron pruebas de inferencia estadística, por lo que las diferencias entre modos se describen como diferencias observadas en el modelo. No se emplearon sujetos humanos ni datos personales: los conjuntos de datos utilizados son de acceso abierto y el de salud contiene tráfico emulado.

## 3. RESULTADOS

Los resultados se presentan según las variables estudiadas: en primer lugar, el desempeño de la línea base por escenario y nivel de SNR; a continuación, el efecto de cada modo de ahorro en la energía y la latencia; y, finalmente, el comportamiento por clase de dispositivo. Los valores absolutos de energía, expresados en Wh, se derivan de la escala adoptada para el modelo del TR 38.840 (1 u = 1 mW) y no constituyen mediciones experimentales de dispositivos físicos. Por su parte, las reducciones porcentuales deben interpretarse dentro de las condiciones del modelo simulado.

La Tabla 3 resume la línea base. En los tres escenarios, el monitoreo entre paquetes concentró más del 99.6 % de la energía, y la transmisión fue una fracción menor: 0.11 ± 0.00 Wh de 102.53 ± 0.00 Wh en el hogar inteligente con SNR = 20 dB. Con esa SNR, las retransmisiones HARQ requirieron el 8.9 % de bloques adicionales, y la pérdida residual de paquetes fue inferior a 0.005 %. Al elevar la SNR a 40 dB, la adaptación a 64-QAM y la eliminación de retransmisiones modificaron el consumo total en menos de 0.1 % en los tres escenarios bajo las condiciones simplificadas del canal utilizado (AWGN con SNR fija, sin pérdida de trayecto ni interferencia). Además, redujeron la latencia en el peor caso (percentil 95) de 4.0 ms a 1.5 ms.

Doi: https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

**Tabla 3.**

*Desempeño de la línea base por escenario y nivel de SNR*

| Escenario | SNR (dB) | E total (Wh) | E Tx (Wh) | E retrans. (Wh) | Pérdida residual (%) | Latencia media / p95 (ms) | $\eta$ (kbit/J) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hogar inteligente | 20 | 102.53 ± 0.00 | 0.11 ± 0.00 | 0.018 ± 0.001 | 0.0043 ± 0.0006 | 1.7 / 4.0 | 3.80 ± 0.15 |
| | 40 | 102.52 ± 0.00 | 0.10 ± 0.00 | 0 | 0 | 1.5 / 1.5 | 3.80 ± 0.15 |
| Salud | 20 | 102.60 ± 0.01 | 0.17 ± 0.01 | 0.028 ± 0.001 | 0.0045 ± 0.0008 | 1.7 / 4.0 | 2.39 ± 0.07 |
| | 40 | 102.58 ± 0.01 | 0.16 ± 0.00 | 0 | 0 | 1.5 / 1.5 | 2.39 ± 0.07 |
| Agricultura | 20 | 102.51 ± 0.01 | 0.10 ± 0.01 | 0.016 ± 0.001 | 0.0047 ± 0.0007 | 1.7 / 4.0 | 20.16 ± 1.39 |
| | 40 | 102.50 ± 0.01 | 0.09 ± 0.01 | 0 | 0 | 1.5 / 1.5 | 20.16 ± 1.39 |

***Nota.*** Media ± DE de 10 corridas de 3 600 s con 1 024 dispositivos. BLER de 8.18 % con 20 dB; con 40 dB no se observaron errores ni retransmisiones en las pruebas realizadas (BER $< 1.25 \times 10^{-7}$ al 95 % de confianza), lo que no equivale a una probabilidad nula. Valores en Wh según la escala 1 u = 1 mW; la DE de la latencia fue ≤ 0.1 ms. Elaboración propia.

La Tabla 4 y la Figura 1 presentan el efecto de los modos. La suspensión obtuvo la mayor reducción del consumo en los tres escenarios: 92.81 ± 0.20 % en hogar inteligente, 89.58 ± 0.26 % en salud y 93.40 ± 0.35 % en agricultura con SNR = 20 dB. Le siguieron la espera (cerca de 80 % en los tres escenarios), la suspensión profunda (59.29 ± 1.15 % a 76.27 ± 1.55 %) y el modo inactivo (cerca de 55 %). La suspensión profunda quedó por debajo de la espera en los tres escenarios porque el establecimiento de conexión concentró entre 91.3 % y 96.8 % de su energía residual. Los resultados con SNR = 40 dB fueron prácticamente idénticos (diferencias menores de 0.1 puntos porcentuales).

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

**Tabla 4.**

*Reducción de energía, latencia y energía de reactivación por modo de ahorro y por política adaptada a cada clase*

| Modo | Reducción, SNR 20 dB (%) | Reducción, SNR 40 dB (%) | Latencia media (ms) | Latencia p95 (ms) | E de reactivación (% del total) |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Hogar inteligente*** | | | | | |
| Inactivo | 54.90 ± 0.00 | 54.91 ± 0.00 | 1.7 ± 0.0 | 4.0 | 0.0 ± 0.0 |
| Espera | 79.95 ± 0.00 | 79.96 ± 0.00 | 9.7 ± 0.0 | 11.7 | 0.0 ± 0.0 |
| Suspensión | 92.81 ± 0.20 | 92.82 ± 0.20 | 66.7 ± 0.0 | 98.2 | 76.6 ± 0.5 |
| Suspensión profunda | 76.13 ± 0.68 | 76.15 ± 0.67 | 258.7 ± 2.7 | 474.4 | 91.3 ± 0.2 |
| Política por clase* | 93.53 ± 0.15 | 93.55 ± 0.15 | 98.0 ± 3.8 | — | — |
| ***Salud*** | | | | | |
| Inactivo | 54.84 ± 0.00 | 54.85 ± 0.00 | 1.7 ± 0.0 | 4.0 | 0.0 ± 0.0 |
| Espera | 79.92 ± 0.00 | 79.94 ± 0.00 | 9.7 ± 0.0 | 11.7 | 0.0 ± 0.0 |
| Suspensión | 89.58 ± 0.26 | 89.60 ± 0.26 | 66.7 ± 0.0 | 98.2 | 82.5 ± 0.3 |
| Suspensión profunda | 59.29 ± 1.15 | 59.32 ± 1.16 | 299.4 ± 0.1 | 480.9 | 96.8 ± 0.1 |
| Política por clase* | 89.96 ± 0.24 | 89.99 ± 0.24 | 90.2 ± 2.6 | — | — |
| ***Agricultura*** | | | | | |
| Inactivo | 54.91 ± 0.01 | 54.92 ± 0.01 | 1.7 ± 0.0 | 4.0 | 0.0 ± 0.0 |
| Espera | 79.95 ± 0.00 | 79.96 ± 0.00 | 9.7 ± 0.0 | 11.7 | 0.0 ± 0.0 |
| Suspensión | 93.40 ± 0.35 | 93.41 ± 0.35 | 66.7 ± 0.0 | 98.2 | 74.9 ± 1.1 |
| Suspensión profunda | 76.27 ± 1.55 | 76.29 ± 1.56 | 297.3 ± 0.1 | 480.1 | 94.8 ± 0.3 |
| Política por clase* | 93.94 ± 0.33 | 93.95 ± 0.33 | 169.2 ± 5.9 | — | — |

***Nota.*** Media ± DE de 10 corridas. Latencia y energía de reactivación con SNR = 20 dB. *Cada clase de dispositivo de la Tabla 2 opera en su modo de menor consumo; latencia media ponderada por dispositivo. Valores relativos a la línea base del modelo simulado. Elaboración propia.

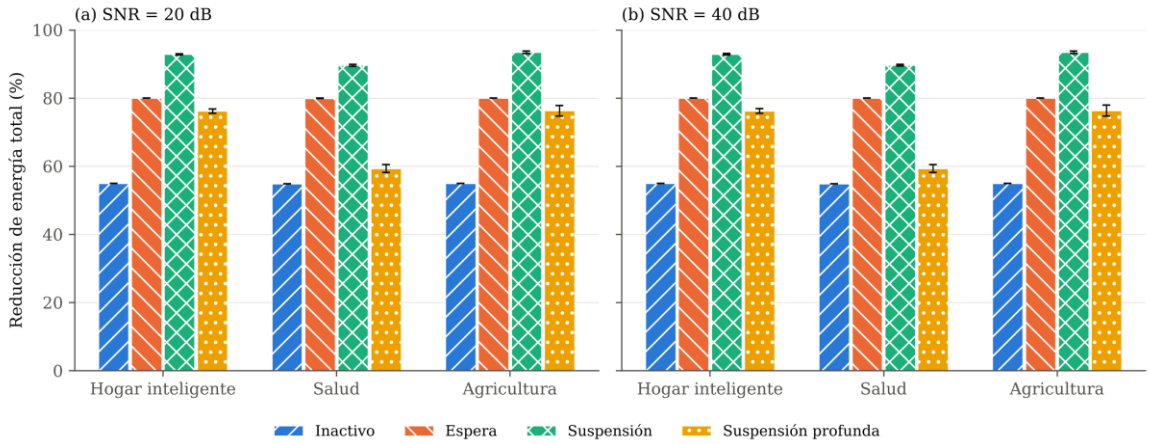
**Figura 1.**

*Reducción de la energía total del módem por modo de ahorro respecto a la línea base: (a) SNR = 20 dB; (b) SNR = 40 dB*

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672

Vol. 3 Núm. 1 (2026)

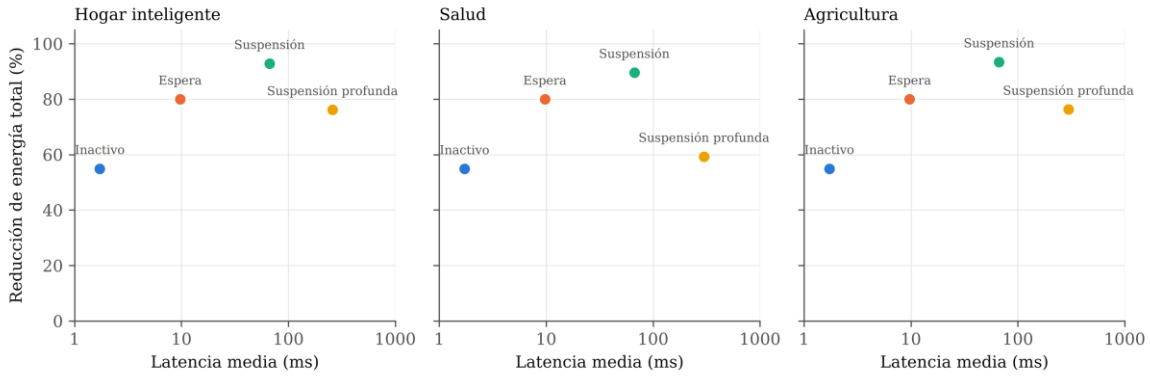



***Nota.*** Barras de error: ± DE de 10 corridas. Elaboración propia.

La Figura 2 muestra el compromiso entre energía y latencia. La latencia media creció con la profundidad del estado: de 1.7 ms en el modo inactivo a cerca de 10 ms en espera, 67 ms en suspensión y entre 258.7 ms y 299.4 ms en suspensión profunda, con un percentil 95 de hasta 480.9 ms. La suspensión ofreció así la mayor reducción con una latencia intermedia, mientras que la suspensión profunda resultó dominada por ella tanto en energía como en latencia.

**Figura 2.**

*Compromiso entre reducción de energía y latencia media por modo de ahorro (SNR = 20 dB)*




***Nota.*** Media de 10 corridas; las barras de ± DE son menores que el marcador. Eje horizontal en escala logarítmica. Elaboración propia.

Al evaluar por separado cada clase de dispositivo de la Tabla 2, el modo de menor consumo dependió del periodo de transmisión; el detalle por clase se incluye en el material suplementario (results_types.csv). La suspensión profunda fue la mejor opción para los

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

dispositivos con periodos de 170 s o más (enchufe TP-Link, marco de fotos, bomba de infusión, GSR y sensores y controladores agrícolas de periodo largo), con reducciones de 98.5 % a 98.9 %. La suspensión lo fue para periodos de 1.4 s a 60 s, que incluyen la mayoría de los dispositivos del hogar y los sensores ambientales de la UCI, con reducciones de 83.7 % a 98.2 %. La espera lo fue para periodos de 1 s o menos (cámara Dropcam, sensores clínicos continuos y robots), con cerca de 80 % y una latencia próxima a 10 ms. Con estos flujos, la suspensión profunda apenas ahorró entre 9 % y 10 %. Estos intervalos de periodo corresponden a los perfiles de dispositivos evaluados y a los parámetros de reactivación adoptados, por lo que no deben interpretarse como umbrales universales de selección. Una política que asigne a cada clase su modo de menor consumo (Tabla 4) alcanzó reducciones de 93.53 ± 0.15 %, 89.96 ± 0.24 % y 93.94 ± 0.33 % en hogar, salud y agricultura, ligeramente superiores a las de la suspensión aplicada a todos los dispositivos.

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que, en el módem de un dispositivo IoT, la energía se consume mayoritariamente en el reposo entre paquetes y no en la transmisión, lo que coincide con la motivación de los mecanismos de ahorro del equipo de usuario del 3GPP (2019) y con la revisión de los mecanismos DRX de Lin et al. (2023). Las reducciones de la suspensión (89.6 % a 93.4 %) superan el rango de 45–63 % reportado por Li et al. (2023) para la suspensión multinivel en redes industriales privadas. Esta diferencia es esperable, porque aquí la línea base mantiene el monitoreo de PDCCH de forma continua y la entrada en los estados de ahorro es inmediata, sin temporizador de inactividad; ambos supuestos favorecen el ahorro, por lo que las cifras deben leerse como cotas superiores. La relevancia de los estados de suspensión coincide con lo observado por López-Pérez et al. (2022) y Ezzeddine et al. (2024) para la red de acceso, donde las estrategias de reposo adaptadas al tráfico constituyen una de las palancas de ahorro más efectivas.

La suspensión profunda no fue la mejor opción a escala de escenario, porque su costo de reactivación (100 ms a 500 ms a 300 mW por cada establecimiento de conexión) solo se amortiza con periodos largos, en línea con el compromiso entre ciclo DRX, latencia y consumo descrito por Lin et al. (2023). En el dominio sanitario, la preferencia por el modo de espera en el monitoreo clínico continuo es coherente con las exigencias de disponibilidad

Doi: https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

y baja latencia del IoT médico señaladas por Osama et al. (2023). En agricultura, la ventaja de la suspensión profunda en sensores de periodo largo concuerda con los esquemas de ciclo de trabajo reducido de Križanović et al. (2023) y Pagano et al. (2023). En cuanto al canal, la SNR influyó poco en este modelo porque la energía de transmisión fue una fracción menor del total; el efecto de la cobertura rural señalado por Lorincz et al. (2022) no puede contrastarse con un canal de SNR fija y deberá evaluarse con un modelo de propagación.

En comparación con los enfoques de estación base, los modelos de consumo y las estrategias de suspensión del gNodeB (López-Pérez et al., 2022; Piovesan et al., 2022) actúan sobre la red y requieren capacidad de cómputo en el controlador; sus métricas de eficiencia no son directamente comparables con las del módem del dispositivo evaluadas aquí. Respecto de la sobrecarga de los modos analizados, conviene distinguir dos dimensiones. La sobrecarga computacional en el controlador de red es nula, porque los modos se gestionan en el dispositivo con reglas locales. La sobrecarga temporal y energética de reactivación, en cambio, es significativa: en la suspensión profunda representó entre el 91 % y el 97 % de la energía residual y elevó la latencia media por encima de 250 ms.

A partir de estos resultados se derivan estrategias por dominio. En el hogar inteligente se recomienda la suspensión para la mayoría de los dispositivos, la espera para las cámaras con tráfico subsegundo y la suspensión profunda para los dispositivos con reportes de varios minutos; la predicción de actividad basada en aprendizaje automático (Laidi et al., 2022) podría ajustar estas transiciones. En salud conviene la espera para los sensores clínicos continuos, con latencias cercanas a 10 ms, la suspensión para los sensores ambientales de 2 s a 5 s y la suspensión profunda para la bomba de infusión y el GSR. En agricultura se recomienda la suspensión profunda para los sensores y controladores de periodo largo, la suspensión para los equipos con reportes por minuto y la espera para la telemetría de los robots (Dhanaraju et al., 2022; Soussi et al., 2024). Entre las limitaciones destacan el canal AWGN con SNR fija, sin modelo de propagación ni interferencia; la ausencia de codificación LDPC; la entrada inmediata en los estados de ahorro; los periodos supuestos en agricultura; la escala relativa de potencia; y la ausencia de pruebas de inferencia estadística.

Doi: https://doi.org/10.63688/1bh0k455

ISSN: 3091-1672
Vol. 3 Núm. 1 (2026)

## 5. CONCLUSIÓN

La suspensión, equivalente a la reanudación desde RRC_INACTIVE, ofreció la mayor reducción del consumo del módem en los tres dominios (92.81 ± 0.20 %, 89.58 ± 0.26 % y 93.40 ± 0.35 % con SNR = 20 dB), con una latencia media de 67 ms. En cambio, la suspensión profunda quedó limitada por el costo de establecer la conexión en cada reactivación y, entre los perfiles evaluados, solo resultó óptima para los dispositivos con periodos de 170 s o más; este valor depende de las latencias y potencias de reactivación adoptadas y no constituye un umbral universal.

La energía del módem estuvo dominada por el reposo entre paquetes y no por la transmisión, por lo que, bajo el canal AWGN simplificado empleado, la calidad del canal tuvo un efecto despreciable sobre el consumo; este resultado podría cambiar con un modelo de propagación e interferencia realista. En los perfiles evaluados, el periodo de transmisión y el presupuesto de latencia de cada clase de dispositivo fueron los factores decisivos, y asignar a cada clase su modo de menor consumo mejoró ligeramente el ahorro global.

Se recomienda que futuras investigaciones incorporen un modelo de propagación e interferencia, la codificación LDPC y los temporizadores de inactividad, que integren la selección adaptativa de modos basada en aprendizaje (Laidi et al., 2022) y que validen los resultados en bancos de prueba 5G con dispositivos RedCap reales.

Más allá del ámbito técnico, los resultados aportan criterios cuantitativos para que operadores, integradores y fabricantes configuren los parámetros de ahorro de los dispositivos según el tipo de aplicación, en concordancia con la planificación del despliegue 5G y la política de eficiencia energética del Ecuador.

Considerando el crecimiento sostenido de los dispositivos conectados y la evolución hacia 6G (Gkagkas et al., 2024; Sufyan et al., 2023), es previsible que la configuración de los estados de ahorro por clase de dispositivo se convierta en un requisito de diseño de las redes masivas de IoT, y que su ajuste dinámico mediante predicción del tráfico sea determinante para su sostenibilidad energética.

**Doi:** https://doi.org/10.63688/1bh0k455

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3rd Generation Partnership Project [3GPP]. (2019). *Study on User Equipment (UE) power saving in NR* (3GPP TR 38.840, Release 16). https://www.3gpp.org/dynareport/38840.htm

Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., y Kaliaperumal, R. (2022). Smart farming: Internet of Things (IoT)-based sustainable agriculture. *Agriculture*, *12*(10), Artículo 1745. https://doi.org/10.3390/agriculture12101745

Espinal, A. G., Torres, A. I., Durango, R., Acurio, A. A., y Oviedo, B. W. (2025). Análisis y optimización del uso del espectro radioeléctrico para comunicaciones móviles mediante tecnologías MIMO. En *Memorias de la Vigésima Cuarta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática (CISCI 2025)* (pp. 423–430). International Institute of Informatics and Systemics. https://doi.org/10.54808/CISCI2025.01.423

Ezzeddine, Z., Khalil, A., Zeddini, B., y Ouslimani, H. H. (2024). A survey on green enablers: A study on the energy efficiency of AI-based 5G networks. *Sensors*, *24*(14), Artículo 4609. https://doi.org/10.3390/s24144609

Ferreira, R., Bispo, I., Rabadão, C., Santos, L., y Costa, R. L. C. (2025). Farm-flow dataset: Intrusion detection in smart agriculture based on network flows. *Computers and Electrical Engineering*, *121*, Artículo 109892. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109892

Gkagkas, G., Vergados, D. J., Michalas, A., y Dossis, M. (2024). The advantage of the 5G network for enhancing the Internet of Things and the evolution of the 6G network. *Sensors*, *24*(8), Artículo 2455. https://doi.org/10.3390/s24082455

Hussain, F., Abbas, S. G., Shah, G. A., Pires, I. M., Fayyaz, U. U., Shahzad, F., Garcia, N. M., y Zdravevski, E. (2021). A framework for malicious traffic detection in IoT healthcare environment. *Sensors*, *21*(9), Artículo 3025. https://doi.org/10.3390/s21093025

Križanović, V., Grgić, K., Spišić, J., y Žagar, D. (2023). An advanced energy-efficient environmental monitoring in precision agriculture using LoRa-based wireless sensor networks. *Sensors*, *23*(14), Artículo 6332. https://doi.org/10.3390/s23146332

Laidi, R., Djenouri, D., y Balasingham, I. (2022). On predicting sensor readings with sequence modeling and reinforcement learning for energy-efficient IoT

applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *52*(8), 5140–5151. https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3116141

Li, W., Park, J., y Oh, C. (2023). An energy-efficient multi-level sleep strategy for periodic uplink transmission in industrial private 5G networks. *Sensors*, *23*(22), Artículo 9070. https://doi.org/10.3390/s23229070

Lin, K.-H., Liu, H.-H., Hu, K.-H., Huang, A., y Wei, H.-Y. (2023). A survey on DRX mechanism: Device power saving from LTE and 5G New Radio to 6G communication systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *25*(1), 156–183. https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3217854

López-Pérez, D., De Domenico, A., Piovesan, N., Xinli, G., Bao, H., Qitao, S., y Debbah, M. (2022). A survey on 5G radio access network energy efficiency: Massive MIMO, lean carrier design, sleep modes, and machine learning. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *24*(1), 653–697. https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3142532

Lorincz, J., Klarin, Z., y Begusic, D. (2022). Modeling and analysis of data and coverage energy efficiency for different demographic areas in 5G networks. *IEEE Systems Journal*, *16*(1), 1056–1067. https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3074100

Osama, M., Ateya, A. A., Sayed, M. S., Hammad, M., Pławiak, P., Abd El-Latif, A. A., y Elsayed, R. A. (2023). Internet of Medical Things and Healthcare 4.0: Trends, requirements, challenges, and research directions. *Sensors*, *23*(17), Artículo 7435. https://doi.org/10.3390/s23177435

Pagano, A., Croce, D., Tinnirello, I., y Vitale, G. (2023). A survey on LoRa for smart agriculture: Current trends and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, *10*(4), 3664–3679. https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3230505

Piovesan, N., López-Pérez, D., De Domenico, A., Geng, X., Bao, H., y Debbah, M. (2022). Machine learning and analytical power consumption models for 5G base stations. *IEEE Communications Magazine*, *60*(10), 56–62. https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2200023

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., y Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. *Sensors*, *24*(8), Artículo 2647. https://doi.org/10.3390/s24082647

Sufyan, A., Khan, K. B., Khashan, O. A., Mir, T., y Mir, U. (2023). From 5G to beyond 5G: A comprehensive survey of wireless network evolution, challenges, and promising technologies. *Electronics*, *12*(10), Artículo 2200. https://doi.org/10.3390/electronics12102200

Wannigama, S., Sivanathan, A., y Habibi Gharakheili, H. (2025). Descriptor: UNSW IoT traffic data with packets, flows, and protocols (UNSW-IoTraffic). *IEEE Data Descriptions*, *2*, 311–323. https://doi.org/10.1109/IEEEDATA.2025.3602010

## CONFLICTO DE INTERESES

No existe.

## FINANCIAMIENTO

No aplica.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Juan Carlos Pisco Vanegas, Diego Fernando Intriago Rodríguez.
Metodología: Juan Carlos Pisco Vanegas, Diego Fernando Intriago Rodríguez, Julius Manuel Vinueza Loor.
Investigación: Juan Carlos Pisco Vanegas, Diego Fernando Intriago Rodríguez, Julius Manuel Vinueza Loor, Ángel Iván Torres Quijije.
Redacción – borrador original: Juan Carlos Pisco Vanegas, Julius Manuel Vinueza Loor.
Redacción – revisión y edición: Juan Carlos Pisco Vanegas, Diego Fernando Intriago Rodríguez, Julius Manuel Vinueza Loor, Ángel Iván Torres Quijije.