

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED IOT
ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE CON PANELES
SOLARES PARA LOS CULTIVOS FLORÍCOLAS EN
ECUADOR.

AUTORES:

Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez

César Marcelino Bravo Fernández

TUTOR PROPUESTO:

Ing. HOLGER SANTILLÁN C. Msc

GUAYAQUIL – ECUADOR

P67-2025-2026

II. CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez con documento de identificación N° 0924996739, y César Marcelino Bravo Fernández con documento de identificación N° 0925541765, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 26 de enero del 2026

Atentamente,



Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez

0924996739



César Marcelino Bravo Fernández

0925541765

III. CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

Nosotros, Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez, con C.I. 0924996739 y César Marcelino Bravo Fernández, con C.I. 0925541765, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Científico: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED IOT ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE CON PANELES SOLARES PARA LOS CULTIVOS FLORÍCOLAS EN ECUADOR”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Telecomunicaciones, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Institución facultada para ejercer plenamente los derechos concedidos.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, a los 26 días del mes de enero del año 2026.

Atentamente,



Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez

0924996739



César Marcelino Bravo Fernández

0925541765

IV. CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.

Yo, Holger Jorge Santillán Carranza, con documento de identificación N° 0916303134 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED IOT ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE CON PANELES SOLARES PARA LOS CULTIVOS FLORÍCOLAS EN ECUADOR, realizado por Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez, con C.I. 0924996739 y César Marcelino Bravo Fernández, con C.I. 0925541765, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, a los 26 días del mes de enero del año 2026.

Atentamente,



Holger Jorge Santillán Carranza

0916303134

V. Dedicatoria

- Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez

Dedico esta tesis, con profundo cariño y gratitud, a mis padres Rodrigo Valdiviezo y Frecia Sánchez, quienes han sido mi principal apoyo a lo largo de mi vida y de mi formación académica. Gracias por el esfuerzo diario, por las oportunidades brindadas y por el ejemplo constante de trabajo, responsabilidad y compromiso. Cada paso que he dado para llegar hasta aquí ha estado acompañado de su guía, de sus consejos y de la fortaleza que me han transmitido en los momentos difíciles. A mi padre, Rodrigo Valdiviezo, le dedico este logro por su respaldo firme y por enseñarme a mantener la disciplina, la constancia y la determinación para cumplir objetivos. Su confianza y sus palabras de aliento han sido fundamentales para continuar aun cuando el camino parecía complicado. A mi madre, Frecia Sánchez, le dedico esta tesis por su amor incondicional, su paciencia y su entrega. Gracias por estar siempre presente, por sostenerme con su apoyo emocional, por motivarme cuando lo necesitaba y por recordarme que con perseverancia se puede superar cualquier obstáculo. Este trabajo representa el cierre de una etapa importante y, al mismo tiempo, es una forma de reconocer todo lo que ustedes han hecho por mí. Este logro también les pertenece.

- César Marcelino Bravo Fernández

Dedico esta tesis, en primer lugar, a mi madre Ibeth María Fernández Carvallo, por su amor incondicional, por ser mi apoyo constante en cada etapa de mi vida y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por acompañarme incluso en los momentos más difíciles, por creer en mí cuando yo dudaba y por impulsarme a no rendirme.

Así mismo, dedico este trabajo a Nadia Pazmiño Padilla, por su compañía, paciencia y motivación diaria. Gracias por estar a mi lado durante este proceso, por brindarme tranquilidad en los momentos de presión y por recordarme siempre que soy capaz de alcanzar mis metas. Su apoyo ha sido una parte fundamental para culminar esta etapa.

VI. Agradecimiento

- Daniel Alexander Valdiviezo Sánchez

Agradezco profundamente a mi padre, Rodrigo Valdiviezo, por su respaldo y orientación a lo largo de este proceso. Gracias por impulsarme a seguir adelante, por su confianza y por el esfuerzo que ha realizado para apoyarme en cada etapa de mi formación. Su ejemplo ha sido una motivación para no rendirme y mantenerme enfocado en mis objetivos.

De igual manera, agradezco a mi madre, Frecia Sánchez, por su amor, paciencia y acompañamiento incondicional. Gracias por estar presente en los momentos difíciles, por darme ánimo cuando más lo necesitaba y por sostenerme con su fortaleza. Su apoyo ha sido clave para culminar esta etapa académica.

Finalmente, expreso mi gratitud a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron para que este proyecto se concrete y para que este objetivo académico se convierta en realidad.

- César Marcelino Bravo Fernández

Agradezco profundamente a mi madre, Ibeth María Fernández Carvallo, por todo el sacrificio y el respaldo que me ha brindado a lo largo de mi formación. Gracias por sostenerme con fortaleza, por darme ánimo en cada obstáculo y por ser la base sobre la cual he construido mis objetivos. Este logro también es suyo.

De igual manera, agradezco a Nadia Pazmiño Padilla por su apoyo emocional, por su comprensión y por acompañarme con cariño y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por motivarme a seguir adelante, por escucharme cuando lo necesitaba y por celebrar conmigo cada avance, por pequeño que haya sido.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a que este proyecto se concrete y a que esta etapa académica llegue a su culminación.

VII. Resumen

Ecuador se ubica entre los principales exportadores mundiales de flores, con una alta concentración productiva en la Sierra (Cayambe, Cotopaxi y Pichincha), donde la altitud y el clima favorecen rosas de gran calidad. Aun así, en muchas haciendas el control de variables clave —temperatura, humedad del aire, humedad del suelo e iluminancia— se realiza sin un monitoreo continuo, lo que aumenta el riesgo de errores en el manejo del cultivo y afecta la toma de decisiones, especialmente en el riego. En este proyecto se diseñó e implementó una red IoT energéticamente eficiente para el monitoreo en tiempo real de estas condiciones, utilizando sensores inalámbricos, comunicación de largo alcance y alimentación mediante paneles solares con baterías de respaldo de 24 a 48 horas. Para mejorar la continuidad del sistema, se incorporó una topología en malla con replicación de datos entre nodos, de modo que la red mantuvo el envío de información aun cuando un nodo perdió conectividad. La propuesta resultó viable y escalable, con enfoque en costos accesibles para pequeños productores y en la reducción de interrupciones por fallas eléctricas.

A) Palabras Clave

1; Floricultura ecuatoriana 2; Red IoT 3; Energía Solar 4; Topología en malla

VIII. Abstract

Ecuador ranks among the world's leading flower exporters, with a high concentration of production in the Sierra region (Cayambe, Cotopaxi, and Pichincha), where the altitude and climate favor high-quality roses. Even so, on many farms, key variables—temperature, air humidity, soil moisture, and illuminance—are controlled without continuous monitoring, which increases the risk of errors in crop management and affects decision-making, especially in irrigation. In this project, an energy-efficient IoT network was designed and implemented for real-time monitoring of these conditions, using wireless sensors, long-range communication, and power from solar panels with 24- to 48-hour backup batteries. To improve system continuity, a mesh topology with data replication between nodes was incorporated, so that the network continued to send information even when a node lost connectivity. The proposal proved to be viable and scalable, with a focus on affordable costs for small producers and reducing interruptions due to power failures.

B) Keywords

1; Ecuadorian floriculture 2; IoT network 3; Solar energy 4; Mesh topology

I.	Portada	1
II.	CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN ...	2
III.	CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	3
IV.	CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	4
V.	Dedicatoria.....	5
VI.	Agradecimiento	6
VII.	Resumen	7
	A) Palabras Clave	7
VIII.	Abstract.....	8
	B) Keywords	8
IX.	Introducción	10
	1. Heltec T114 (microcontrolador con LoRaWAN).....	13
	2. Raspberry Pi 4 (gateway de datos).....	14
	3. Sensor SHT31 (Temperatura y Humedad del Aire).....	14
	4. Sensor TSL2561 (Iluminancia Solar).....	15
	5. Sensor Capacitivo de Humedad del Suelo	15
	6. Paneles solares y sistema de respaldo energético.....	16
	7. Integración con AWS IoT Core	17
	8. Tailscale (Acceso remoto seguro para la gestión de la red IoT).....	17
	9. ADS115 (Convertidor Analógico a Digital).....	17
	10. Ecuaciones a utilizar en el proyecto.	18
X.	Artículos relacionados.....	19
XI.	Metodología	21
	1. Esquema del prototipo para de una red IoT energéticamente eficiente con paneles solares	22
	2. Etapas del Prototipo propuesto.....	25
	3. Pasos de la realización del prototipo	27
XII.	Resultados	31
	Datos obtenidos	31
	1.1 Ecuaciones a utilizar	37
XIII.	Discusión	38
XIV.	Conclusiones	41
XV.	Recomendaciones	41
	Referencias.....	43
XVI.	Anexos.....	45
	Anexo 1.....	45
	Anexo 2.....	58

IX. Introducción

La floricultura constituye uno de los principales pilares económicos del Ecuador, impulsada por la diversificación de las exportaciones hacia mercados internacionales y por la alta calidad de sus flores, lo que le ha permitido mantener una posición relevante en el mercado mundial [1]. Actualmente, el sector cuenta con el sello Flor Ecuador Certified, que respalda aspectos de calidad, producción y compromiso con la responsabilidad social, fortaleciendo su competitividad y proyección internacional.

En un entorno global caracterizado por una elevada competencia, Ecuador se posiciona entre los tres principales exportadores de flores, consolidando su presencia en destinos estratégicos como Estados Unidos, Europa y Rusia, y aportando de manera directa al incremento del empleo en el país [2].

La producción florícola se concentra principalmente en la región Sierra, destacando provincias como Cayambe, Cotopaxi y Pichincha, donde el clima proporciona condiciones favorables para obtener rosas de mayor tamaño, colores más intensos y una durabilidad superior frente a otros países productores [3]. La altitud característica de estas zonas contribuye al crecimiento de rosas con tallos largos y firmes, un efecto asociado al desarrollo más lento propio de regiones elevadas [4].

Asimismo, la combinación de temperaturas moderadas y una adecuada radiación lumínica favorece la formación de botones de gran tamaño y pétalos con colores más definidos, atributos altamente valorados en mercados de exportación. Estas condiciones, aunque ventajosas, requieren un manejo técnico constante debido a la influencia directa que tienen las variables ambientales sobre el crecimiento y la calidad final del producto.

A pesar de este escenario favorable, numerosos floricultores aún no disponen de sistemas de monitoreo orientados a sus necesidades, lo que incrementa la probabilidad de errores en decisiones críticas como el riego y el control del microclima. Esta limitación puede reducirse mediante la implementación de tecnologías que apoyen la toma de decisiones con información continua y confiable [5].

En este sentido, resulta fundamental comprender el contexto real en el que operan los productores para identificar oportunidades de mejora, ya sea con enfoque en mayor productividad o en un cuidado más preciso del cultivo. En las últimas décadas, el Internet de las Cosas (IoT) ha permitido desarrollar sistemas capaces de monitorear en tiempo real mediante sensores inalámbricos, aportando fiabilidad en la captura de datos y facilitando la agricultura inteligente basada en mediciones constantes [6].

Para asegurar que el monitoreo sea viable en entornos rurales y extensos, se requiere integrar tecnologías de comunicación de largo alcance y eficiencia energética. En este marco, LoRa se ha consolidado como una alternativa adecuada para áreas agrícolas, debido a que permite transmitir datos a grandes distancias con bajo consumo energético y adaptarse a las necesidades operativas de las haciendas [7], [8]. De esta manera, el uso de IoT y comunicaciones de largo alcance se plantea como un soporte tecnológico clave para mejorar el control de variables ambientales y reducir incertidumbre en el manejo de cultivos florícolas, fortaleciendo la calidad y la continuidad productiva.

El diseño de una red IoT energéticamente eficiente con paneles solares y replicación de datos entre nodos aporta un beneficio directo en la continuidad del monitoreo en tiempo real dentro de cultivos florícolas en Ecuador. Al integrar alimentación fotovoltaica con baterías de respaldo, el sistema mantiene su operación aun cuando existen cortes eléctricos, reduciendo la dependencia de la red convencional y mejorando la estabilidad energética del despliegue. De forma complementaria, la implementación de una topología en malla con replicación de datos incrementa la resiliencia de la red, ya que, ante la caída o pérdida de conectividad de un nodo, los demás pueden reenviar la información mediante rutas alternativas, evitando interrupciones y minimizando la pérdida de datos relevantes para el agricultor.

Las principales problemáticas abordadas se relacionan, en primer lugar, con la necesidad de mantener un control preciso de variables ambientales críticas para la calidad del cultivo, tales como humedad del aire, humedad del suelo, temperatura e iluminancia solar. Estas mediciones cumplen un rol clave al proporcionar información continua para decisiones como el riego y el manejo del

microclima, y distintos estudios señalan que el monitoreo ambiental mediante redes IoT y sensores inalámbricos contribuye a la estabilidad productiva en cultivos sensibles [9]. En segundo lugar, la inestabilidad eléctrica en zonas rurales provoca fallos, pérdidas de información e interrupciones prolongadas en redes IoT, lo cual puede comprometer el desempeño del sistema completo si no existe respaldo energético, una dificultad ampliamente reconocida en este tipo de implementaciones [10].

Dado que la mayoría de las haciendas florícolas se ubican en zonas rurales alejadas, los cortes e intermitencias del suministro eléctrico afectan de forma directa la continuidad del monitoreo ambiental, un aspecto crítico para sostener la calidad de producción. Por ello, se vuelve indispensable contar con un sistema que mantenga la captura de datos sin requerir presencia constante ni depender de la red eléctrica, lo que además reduce mano de obra y costos asociados al control manual.

En consecuencia, la tolerancia a fallos eléctricos se plantea como un requisito no negociable, y su implementación debe ajustarse a un presupuesto asequible y con proyección de escalabilidad [11]. Al cubrir estas vulnerabilidades, se fortalece un sistema seguro y confiable, pensado para ser accesible a pequeños productores y fácil de expandir, contribuyendo a cerrar brechas tecnológicas dentro de la industria florícola ecuatoriana [12].

En este contexto, el objetivo general de la investigación fue diseñar e implementar una red IoT con una estructura energéticamente eficiente, basada en tecnología LoRaWAN, que garantice el monitoreo y control continuo de la producción florícola en las principales zonas de cultivo del Ecuador. Para alcanzar este propósito, se planteó como base técnica la integración de comunicación de largo alcance con bajo consumo y un esquema de alimentación autónoma que asegure operación estable en entornos rurales, donde la continuidad del servicio es un factor determinante para la calidad del cultivo.

De manera complementaria, los objetivos específicos se orientaron a analizar y seleccionar los dispositivos y sensores adecuados para medir las condiciones ambientales relevantes en floricultura; diseñar una arquitectura de red que

optimice el consumo energético con respaldo solar y capacidad de monitoreo en tiempo real; comprobar el funcionamiento del sistema en términos de estabilidad y consistencia en la toma de datos; y añadir un mecanismo de replicación de información que mantenga la continuidad del registro ante fallos o caídas de nodos, fortaleciendo la resiliencia de la red y evitando pérdidas de datos críticos para la toma de decisiones.

En síntesis, la presente investigación se enmarca en la necesidad de fortalecer la floricultura ecuatoriana mediante herramientas tecnológicas que aseguren un monitoreo ambiental continuo, confiable y adaptado a las condiciones reales de producción en zonas rurales. La integración de una red IoT energéticamente eficiente, con comunicación de largo alcance, respaldo solar y mecanismos de resiliencia como la replicación de datos, permite reducir interrupciones, minimizar pérdidas de información y mejorar la calidad de la toma de decisiones en campo.

Con ello, se busca aportar una solución técnica viable y escalable que contribuya a mantener la competitividad del sector, optimizar recursos y disminuir brechas tecnológicas, estableciendo una base sólida para futuras ampliaciones orientadas a un manejo más inteligente y sostenible de los cultivos florícolas en Ecuador.

El Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura ha permitido crear a sistemas inteligentes que incorporan sensores, microcontroladores y tecnologías de comunicación de largo alcance para monitorear las variables ambientales. Estos sistemas han sido desarrollados para mejorar la toma de decisiones en cultivos sensibles, como la floricultura ecuatoriana. Variaciones en la temperatura, humedad e iluminación influyen en la calidad del producto final.

1. Heltec T114 (microcontrolador con LoRaWAN)

Es un microcontrolador que incorpora nativamente tecnología LoRaWAN, opera en bandas de 863-928 MHz para la transmisión de datos enfocado a la transmisión de datos a larga distancia con bajo consumo de energía gracias a la inclusión de una antena LoRa con conector macho I-PX. Su uso en la agricultura permite construir nodos distribuidos que recolectan información continuamente sin importar la complejidad de la estructura. Incorpora además modos de bajo

consumo que ayuda a minimizar su uso, una alta sensibilidad de recepción que mejora la estabilidad del enlace para la transmisión de datos y en conjunto ayuda a prolongar su autonomía del sistema en entornos rurales. [13].

2. Raspberry Pi 4 (gateway de datos)

En la Raspberry Pi 4 la puerta de enlace clave del sistema, es un dispositivo adecuado. Debido a su capacidad de procesamiento, enlaces Wi-Fi y soporte de servicios en la nube, funciona como un producto apropiado para el procesamiento y reenvío de datos capturados de los nodos Heltec T114 [14]. En los diseños tradicionales de IoT agrícolas, las Raspberry Pi son un intermediario entre los sensores de campo y plataformas como AWS IoT Core, asegurando que los datos se almacenen y se visualicen en gráficos, así como la automatización de funciones analíticas. Su flexibilidad y estabilidad también le han permitido establecerse como el centro de operaciones para redes IoT dirigidas al monitoreo ambiental [15].

El uso operativo de Raspberry Pi como gateway permite implementar mecanismo de seguridad, almacenamiento y gestionar mediante acceso remoto, esto facilita el control del sistema sin necesidad operarlo físicamente. En los entornos florícolas donde extensos la Raspberry Pi funciona de manera central lo que garantiza el flujo de información hacia diferentes plataformas de análisis y visualización, además que el uso de Linux como kernel ayuda a gestionar hardware y recursos de forma eficiente ofreciendo compatibilidad con protocolos necesarios a usar para la comunicación y ejecución de servicios locales de análisis, lo que incrementa la escalabilidad y confiabilidad para sistemas IoT.

3. Sensor SHT31 (Temperatura y Humedad del Aire)

El SHT31 es un sensor con un alto grado de precisión y estabilidad. Se utiliza ampliamente en la agricultura [16]. En los cultivos de floricultura, donde las variaciones de temperatura y humedad pueden afectar no solo los tiempos de apertura de las flores, sino también su tiempo de vida post-cosecha, el sensor proporciona información confiable con bajos niveles de consumo de energía y la

capacidad de interactuar digitalmente incluso en sistemas remotos LoRaWAN [17]. Algunos estudios indican que la integración de sensores de alta precisión como el SHT31 en redes destinadas a la floricultura mejora la confiabilidad de los datos obtenidos y reduce la incertidumbre en la toma de decisiones. Con la integración del SHT31 en redes IoT agrícolas se responde la necesidad de mediciones precisas y estables de las variables ambientales, ayuda con la reducción del margen de error en la toma de decisiones, son utilizados como entrada para sistemas de monitoreo remoto. Gracias a su interfaz I2C digital y de rápida respuesta, permite mantener una alta consistencia de las mediciones ambientales orientadas al uso de entornos agrícolas con condiciones climáticas variables de la Sierra.

4. Sensor TSL2561 (Iluminancia Solar)

El sensor de iluminación solar TSL2561 permite la medición de la luz solar con una mayor precisión en la etapa de crecimiento de las flores, la luz es importante ya que esta estimula procesos vitales como la fotosíntesis y el desarrollo estructural [18]. En sistemas de redes agrícolas permite el análisis de la exposición solar a lo largo del día, lo que facilita la toma de decisiones con respecto al sombreado, la ubicación de los cultivos y el control. Debido a su bajo consumo energético y facilidad de integración se convierte en una herramienta esencial para operar en estos entornos. El uso del TSL2561 en aplicaciones de agricultura inteligente se fundamenta en la importancia de la radiación solar como factor determinante del desarrollo vegetal. La iluminancia influye de manera directa en la fotosíntesis, la formación y la calidad cromática de las flores, aspectos clave en la producción florícola de exportación. Además, su interfaz digital permite una fácil integración con sistemas IoT agrícolas, facilitando la recepción continua de datos confiables para el monitoreo remoto que ayude a la optimización de las condiciones necesarias en entornos de alta producción.

5. Sensor Capacitivo de Humedad del Suelo

El sensor capacitivo es ideal para medición de la humedad del sustrato, previene la corrosión causada por sensores tradicionales. La humedad del suelo debe llevar un control importante para evitar problemas de riego excesivo, estrés hídrico o la proliferación de hongos. Los sensores capacitivos son ampliamente

utilizados en proyectos agrícolas para ser parte de un sistema de Internet de las Cosas (IoT) instalado en un entorno adverso o altamente húmedo debido a su durabilidad, precisión [19].

Los sensores capacitivos de humedad del suelo se diferencian de las tecnologías resistivas tradicionales por su mayor durabilidad y estabilidad en ambientes húmedos. La humedad del sustrato es una variable crítica, ya que un manejo inadecuado del riego puede provocar estrés hídrico, pérdida de nutrientes y afectaciones en el desarrollo del cultivo. Además, su principio basado en las variaciones capacitivas ayuda a obtener mediciones con estabilidad a largo plazo, que facilita la integración en nodos IoT agrícolas que apoyan a los sistemas de monitoreo continuo orientados a la optimización del riego cuando lo sea necesario.

6. Paneles solares y sistema de respaldo energético

Los nodos IoT utilizan paneles solares de 15W y baterías de 6000 mAh, lo que permite que funcionen de manera autónoma incluso durante cortes de energía prolongados [21]. La tecnología de agricultura inteligente se está desarrollando actualmente para utilizar fuentes de energía renovable y asegurar la continuidad operativa. En las áreas rurales, este sistema energético está demostrando ser muy efectivo y robusto, permitiendo la independencia energética y evitando la necesidad de mantenimiento regular [22].

Los paneles solares presentan un diseño compacto y de fácil visualización con las siguientes dimensiones aproximadas de 41,4 x 21,8 x 0,51 cm, lo que facilita a los productores agrícolas a su fácil instalación. Su tecnología monocristalina mejora la eficiencia de conversión energética para el adecuado respaldo de suministro. Operan con una salida estándar de 5V mediante conexión USB Tipo C, permitiendo la recarga estable y eficiente de baterías.

El sistema de respaldo energético que contiene polímero de litio de 6000mAh, con un voltaje nominal de 3,7V y una energía aproximada de 22,2Wh que permite almacenar de forma prolongada su funcionamiento que fomenta minimizar los ciclos de carga y descarga para mejorar su vida útil. Sus dimensiones son de 9,0 x 6,0 x 1,0 adecuadas para garantizar sencilla operatividad.

7. Integración con AWS IoT Core

Las plataformas de gestión de la nube como AWS IoT Core se utilizan para almacenar, visualizar y analizar grandes volúmenes de datos a través de la red. Dicha integración es común en el trabajo actual de IoT debido a su escalabilidad, sólida seguridad y capacidad para ejecutar procesos auxiliares como alarmas, paneles de control y análisis estadísticos. AWS proporciona la capacidad de hacer posible la replicación de datos entre nodos, resultando en una solución más fuerte y tolerante a fallos, consistente con los requisitos de la floricultura ecuatoriana.

8. Tailscale (Acceso remoto seguro para la gestión de la red IoT)

Tailscale es una red privada virtual (VPN) que nos facilita el acceso y control de manera remota de diferentes dispositivos, este resulta muy útil en entornos donde se necesita el control de variables ambientales, y la gestión mediante dispositivos remotos. Esta plataforma nos brinda la facilidad de levantar una conexión sin necesidad de configurar puertos o protocolos complejos, Tailscale asigna una IP pública a nuestro gateway con lo que permite el acceso a usuarios a distancia.

Las soluciones para acceso remoto como Tailscale en entornos agrícolas, donde los dispositivos se encuentran desplegados en ubicaciones remotas, el acceso remoto facilita la administración, mantenimiento y supervisión del sistema sin necesidad de desplazamientos físicos.

Tailscale permite establecer una red privada cifrada entre el gateway IoT y los dispositivos del usuario, sin requerir configuraciones complejas de red.

Esta característica aporta una capa adicional de seguridad y confiabilidad, complementando la arquitectura IoT y garantizando la continuidad operativa del sistema de monitoreo ambiental.

9. ADS115 (Convertidor Analógico a Digital)

El ADS1115 es un convertidor de analógico a digital ADC de 16 bits que permite la lectura de voltajes con mejor resolución que los convertidores integrados en los microcontroladores. Dispone de ganancia programable para ajustar el rango

de medición de la señal recibida. El protocolo I²C se emplea para la comunicación, su uso es común en sistemas que requieren una lectura analógica precisa.

Su uso resulta relevante para este entorno agrícola, donde muchos sensores entregan señales analógicas de baja amplitud que es de suma importancia incrementar su precisión para evitar errores de lectura. Gracias a su mejora de resolución 16 veces mayor frente al ADC interno del microcontrolador que ayuda a distinguir variaciones de voltaje bajas. Esto es posible adaptar por su ganancia programable que se integra con el rango de entrada. Asimismo, contiene protocolos I2C para su integración con microcontroladores y nodos IoT de bajo consumo, siendo la mejor opción para tomar soluciones viables.

10. Ecuaciones a utilizar en el proyecto.

El VPD se define como la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire (e_s), determinada por la temperatura tal como se muestra en la ecuación 1, y la presión de vapor real (e_a) tal como se muestra en la ecuación 2, determinada por la humedad relativa; por tanto, se calcula como $VPD = e_s - e_a$ (ecuación 3), con $e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)$ y $e_a = e_s \cdot \frac{RH}{100}$, donde T se expresa en °C y RH en %. Este indicador permite estimar la demanda evaporativa del ambiente y facilita la interpretación de periodos de mayor exigencia atmosférica para el cultivo, complementando el análisis de las variables medidas por la red IoT.

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (1)$$

e_s = presión de vapor de saturación del aire

T = temperatura del aire

RH = humedad relativa

$$e_a = e_s \cdot \frac{RH}{100} \quad (2)$$

e_a = presión de vapor real

e_s = presión de vapor de saturación del aire

RH = humedad relativa

$$VPD = e_s - e_a \quad (3)$$

$VPD =$ Déficit de Presión de Vapor

$e_a =$ presión de vapor real

$e_s =$ presión de vapor de saturación del aire

X. Artículos relacionados

Este artículo presenta una red IoT basada en LoRaWAN para monitoreo ambiental en tiempo real, destacando el valor de obtener datos y visualizarlos de forma clara para apoyar decisiones del productor. La semejanza con este proyecto está en la lógica extremo a extremo (sensado–transmisión–plataforma–visualización) y en la necesidad de confiabilidad en campo, donde mediciones cercanas al cultivo superan a estaciones lejanas. La diferencia principal es el dominio (acuicultura vs. floricultura) y enfatiza además eficiencia energética con paneles solares y continuidad por replicación entre nodos, orientado a evitar pérdida de datos ante fallas de conectividad [25].

El artículo propone un sistema de agricultura inteligente con LoRaWAN y una capa de soporte a decisiones (DSS) a partir de monitoreo en tiempo real, integrando sensores y una aplicación para seguimiento remoto. En comparativa esta comparte el enfoque de captura continua de variables críticas (temperatura, humedad, luz, suelo), pero se diferencia en el alcance se centra en garantizar operación estable en zonas rurales con intermitencia eléctrica mediante energía solar y respaldo, y en fortalecer la red con replicación de datos para tolerancia a fallos, más que en incorporar un DSS o análisis predictivo como componente principal [26].

Este artículo implementa un sistema de riego con IoT alimentado por energía solar, integrando censado y control de una bomba con actualización a la nube y acceso por interfaz móvil. La semejanza más directa está en el objetivo de autonomía energética y operación sostenida en campo, alineado con el problema de cortes eléctricos. La diferencia se prioriza la arquitectura de red (enlaces de largo alcance tipo LoRa/LoRaWAN, gateway y nube) y la continuidad de datos mediante replicación, mientras que este trabajo se enfoca en la portabilidad del

sistema y el control del riego como núcleo del aporte [27].

El estudio analiza la eficiencia energética de redes basadas en LoRa/LoRaWAN para agricultura de precisión, resaltando cómo parámetros de comunicación (por ejemplo, tamaño de paquete y tasa de transmisión) influyen de forma importante en el consumo y la autonomía del nodo. Esto se relaciona porque el diseño busca una red energéticamente eficiente y operativa por periodos prolongados, donde la configuración del enlace puede ser tan decisiva como el hardware. Además del ajuste energético, se incorpora una capa de resiliencia por replicación y un enfoque aplicado al contexto florícola ecuatoriano y su operación en zonas rurales [28].

Este trabajo presenta una plataforma IoT con LoRaWAN, gateway y backend en la nube para monitorear humedad de suelo y apoyar decisiones de riego en un cultivo real, mostrando una arquitectura práctica y escalable. Se compara al proyecto en la elección de comunicación de largo alcance y en la idea de convertir datos del campo en información útil mediante dashboards. La diferencia clave está en el sistema que está pensado para floricultura y contempla explícitamente respaldo energético solar y continuidad de datos ante caída de nodos (replicación/rutas alternativas), lo cual apunta a mantener el monitoreo sin interrupciones, no solo a optimizar riego [29].

Este artículo se centra en el rendimiento de soluciones IoT con LoRa, evaluando factores como distancia, entorno y condiciones climáticas, y analizando el comportamiento de una red con múltiples transmisores hacia un receptor. Su aporte es directamente comparable en la validación de la red: en floricultura también necesitas justificar alcance, estabilidad y pérdida de paquetes bajo condiciones. Además, agrega un componente estructural adicional: la replicación de datos entre nodos para sostener la continuidad del sistema cuando existan fallos, complementando la optimización del enlace con una estrategia de resiliencia de la red [30].

XI. Metodología

La metodología de este proyecto se desarrolló bajo un enfoque experimental y aplicado, orientado al diseño e implementación de un prototipo IoT

energéticamente eficiente para el monitoreo continuo de variables ambientales relevantes en cultivos florícolas del Ecuador. El propósito principal fue asegurar una toma de datos estable y confiable en condiciones rurales, considerando tanto la variabilidad ambiental del cultivo como las limitaciones de conectividad y suministro eléctrico. Para ello, el trabajo combinó instrumentación con sensores, comunicación de largo alcance y un sistema de alimentación autónomo mediante energía solar, con el fin de reducir interrupciones y proporcionar información útil para la toma de decisiones en campo.

El proceso inició con el análisis de requerimientos, donde se identificaron las necesidades del entorno florícola y se definieron las variables prioritarias a medir: temperatura y humedad del aire, humedad del suelo e iluminancia solar. En esta etapa también se establecieron criterios operativos del sistema, como periodicidad de muestreo, cobertura requerida, condiciones de instalación y restricciones asociadas a disponibilidad energética. Con base en estos requerimientos, se seleccionaron los dispositivos y sensores del prototipo, priorizando precisión de medición, bajo consumo y compatibilidad con comunicaciones de largo alcance. Se integró un microcontrolador Heltec T114 con LoRaWAN en 915 MHz como nodo de censado, sensores SHT31, TSL2561 y un sensor capacitivo de humedad del suelo; adicionalmente, se consideró el uso del ADC ADS1115 cuando fue necesario mejorar la resolución de lecturas analógicas.

Posteriormente, se diseñó la arquitectura de la red IoT definiendo la topología de comunicación y el flujo de datos desde los nodos hacia un gateway basado en Raspberry Pi 4, encargado de recibir, procesar y reenviar la información hacia la nube. En paralelo, se modeló el sistema energético del nodo IoT, integrando paneles solares y baterías de respaldo para garantizar autonomía y mantener la operación durante cortes eléctricos. Como componente de resiliencia, se incorporó un mecanismo de replicación de datos entre nodos, con el objetivo de

conservar el registro de información y evitar pérdidas cuando ocurrieran caídas o fallos de conectividad en un punto de la red.

Una vez definida la arquitectura, se procedió con la implementación del prototipo, que incluyó el armado físico del nodo IoT, la instalación del sistema de alimentación solar, la configuración de enlaces LoRaWan y la programación de adquisición, empaquetado y transmisión de datos. En el gateway se configuró la conectividad hacia internet y la integración con AWS IoT Core para el almacenamiento y visualización de la información, asegurando trazabilidad de los registros y disponibilidad de datos para análisis posteriores. Finalmente, se realizó la validación del sistema mediante pruebas controladas, evaluando el consumo energético del nodo, el comportamiento del enlace LoRaWAN en términos de alcance y estabilidad, y la confiabilidad de las mediciones capturadas por los sensores. Con ello, se comprobó el funcionamiento integral del prototipo y su capacidad de mantener el monitoreo continuo con tolerancia a fallos energéticos y de comunicación, alineado con los requerimientos del entorno florícola.

1. Esquema del prototipo para de una red IoT energéticamente eficiente con paneles solares

Para el desarrollo de este prototipo se implementó un sistema de monitoreo ambiental en tiempo real orientado a cultivos florícolas, donde se integraron sensores, microcontroladores y módulos de comunicación de largo alcance eficientes, junto con librerías y herramientas de software para la adquisición, transmisión y visualización de datos. El prototipo se diseñó para operar con bajo consumo energético y con respaldo mediante paneles solares y baterías, garantizando continuidad de funcionamiento incluso ante cortes eléctricos en zonas rurales.

En la figura 1 se presenta la conexión e integración de los componentes utilizados, incluyendo el nodo IoT basado en el microcontrolador Heltec T114 con LoRaWAN, los sensores ambientales (temperatura/humedad del aire, iluminancia y humedad del suelo), el sistema de alimentación fotovoltaico y el gateway implementado con una Raspberry Pi 4. Así mismo, se muestra el entorno de configuración y

programación empleada para la gestión del prototipo, donde se utilizaron librerías de comunicación y procesamiento de datos para enviar la información hacia la nube y permitir su análisis y visualización por parte del productor o técnico agrícola.

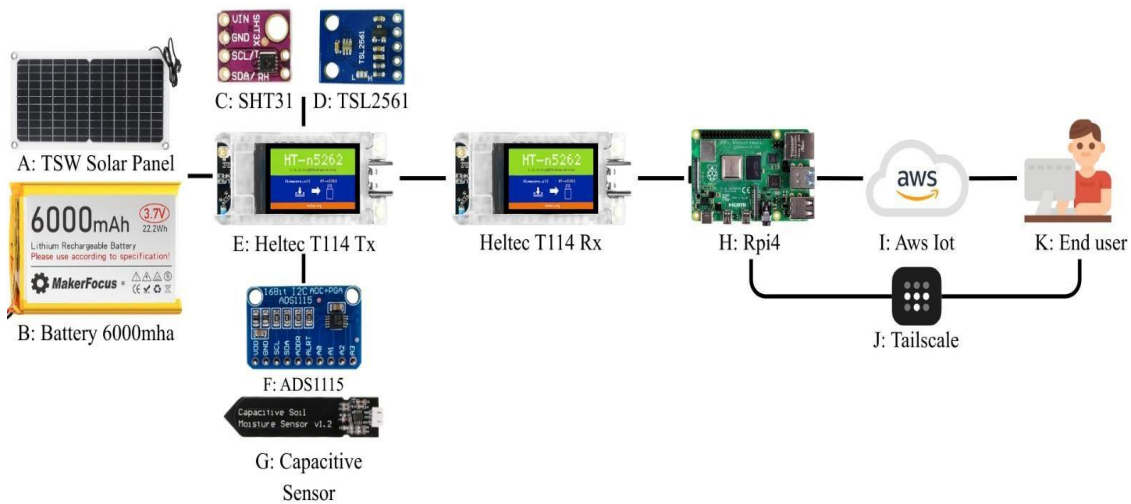


Figura 1. Esquema grafico del prototipo.

Componentes:

- A. Panel solar
- B. Baterías
- C. Sensor de temperatura y humedad SHT31
- D. Sensor de iluminación solar TSL2561
- E. Heltec T114 Nrf52840
- F. Convertidor analógico digital ADS1115
- G. Sensor capacitivo de la humedad del suelo
- H. Raspberry Pi
- I. AWS IoT Core
- J. Tailscale
- K. End User

El sistema se estructura como una arquitectura IoT moderna orientada al monitoreo ambiental continuo en cultivos florícolas, diseñada para operar con bajo consumo energético y alta disponibilidad en zonas rurales. El proceso inicia en el campo, donde los sensores (temperatura y humedad del aire, iluminancia y humedad del suelo) capturan mediciones en intervalos definidos y las entregan al nodo IoT basado en el microcontrolador Heltec T114. Este nodo actúa como punto de adquisición y preprocesamiento, organizando las lecturas, aplicando calibraciones básicas cuando corresponde y preparando los datos para su transmisión. La alimentación se realiza mediante un sistema fotovoltaico compuesto por panel solar y baterías, garantizando autonomía operativa aun ante cortes eléctricos.

La lógica del nodo se gestiona mediante firmware embebido, encargado de controlar el ciclo de muestreo, la lectura de sensores por buses como I²C/ADC (incluyendo el ADS1115 cuando se requiere mayor resolución), y la construcción del paquete de telemetría con identificadores, marca de tiempo y valores de cada variable. Una vez recopilada la información, el nodo transmite los datos utilizando LoRa/LoRaWAN en la banda de 915 MHz, aprovechando el largo alcance y el bajo consumo de esta tecnología para cubrir distancias propias de haciendas florícolas.

En el nivel de infraestructura, un gateway implementado con Raspberry Pi 4 recibe los mensajes LoRa provenientes del campo y funciona como puente hacia internet. En esta etapa, el gateway valida, organiza y reenvía la telemetría hacia la nube, manteniendo trazabilidad y continuidad del flujo de datos incluso en escenarios de conectividad variable. La integración con AWS IoT Core permite registrar, almacenar y administrar los datos de manera segura, facilitando su posterior visualización y análisis mediante paneles o servicios asociados. Adicionalmente, el acceso remoto seguro mediante Tailscale permite administrar el gateway, revisar el estado del sistema y ejecutar mantenimiento sin necesidad de desplazarse físicamente al sitio.

Finalmente, los datos almacenados en la nube se presentan al usuario mediante una interfaz de visualización, donde el productor o técnico agrícola puede revisar tendencias, valores en tiempo real y el comportamiento de las variables

ambientales a lo largo del tiempo. Esta capa de visualización convierte la telemetría en información práctica para apoyar decisiones, especialmente en el riego y el manejo del microclima, sin que el usuario final tenga que interactuar con la complejidad técnica de la red. Con ello, la arquitectura integra de forma completa el ciclo de medición–transmisión–almacenamiento–visualización, manteniendo como prioridad la eficiencia energética y la continuidad operativa del monitoreo en entornos florícolas.

2. Etapas del Prototipo propuesto

Con el fin de garantizar una correcta elaboración del prototipo y maximizar su efectividad en condiciones reales de campo, el proceso se dividió en etapas que permitieron organizar el trabajo, optimizar tiempos y validar cada componente antes de su integración final. Esta planificación facilitó identificar riesgos técnicos (energía, comunicación y estabilidad de datos) y asegurar que el sistema cumpla con el monitoreo continuo requerido en entornos florícolas. En la figura 2 se presentan las fases principales que se siguieron durante el desarrollo del prototipo, desde la definición de requerimientos hasta la validación del sistema completo.

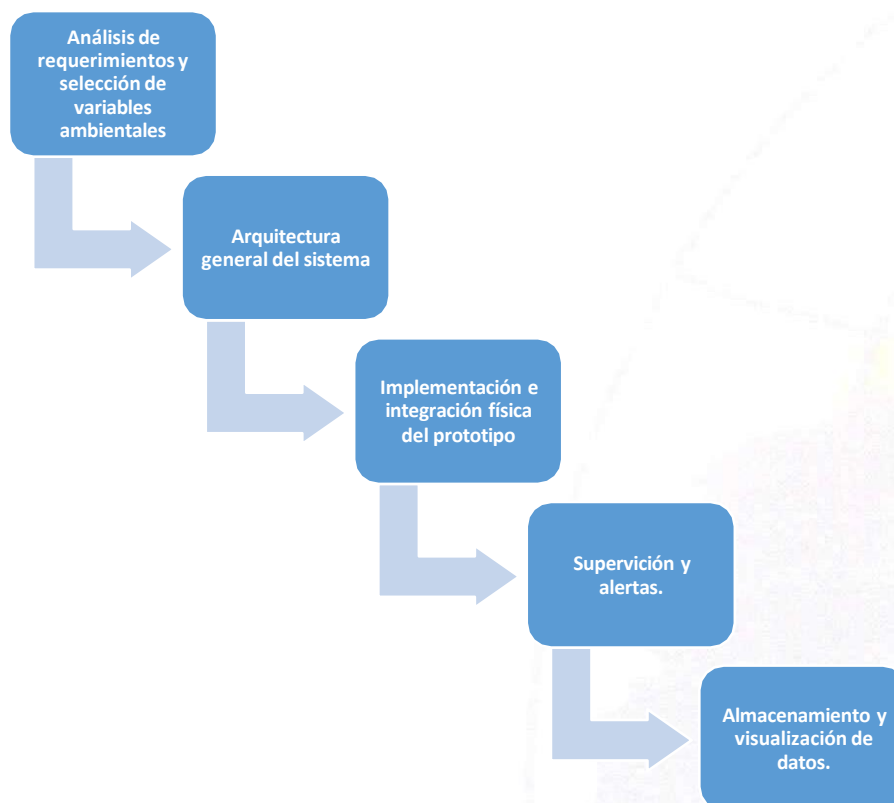


Figura 2. Etapas del desarrollo del prototipo.

La primera etapa correspondió al análisis de requerimientos y selección de variables ambientales, donde se definieron los parámetros críticos para el cultivo (temperatura y humedad del aire, humedad del suelo e iluminancia). En paralelo, se establecieron criterios operativos como periodicidad de muestreo, alcance de comunicación, condiciones de instalación y tolerancia a interrupciones eléctricas. Con base en ello, se realizó la selección de componentes considerando precisión, bajo consumo y compatibilidad de integración, incorporando el microcontrolador Heltec T114 con LoRaWAN, sensores SHT31, TSL2561 y un sensor capacitivo de humedad del suelo, además del ADS1115 para mejorar la resolución en lecturas analógicas cuando fue necesario.

En la segunda etapa se diseñó la arquitectura general del sistema, definiendo el flujo de datos desde el nodo IoT hacia el gateway y posteriormente a la nube. Se estableció el esquema de transmisión mediante LoRa/LoRaWAN en 915 MHz, priorizando la eficiencia energética y la estabilidad del enlace en distancias típicas de haciendas. Asimismo, se diseñó el modelo energético con panel solar y baterías, considerando la autonomía requerida para operar durante cortes eléctricos prolongados y garantizando continuidad en la captura y reenvío de telemetría.

La tercera etapa consistió en la implementación e integración física del prototipo, donde se realizó el montaje del nodo IoT con sus sensores, el sistema fotovoltaico y los elementos de enlace requeridos (antena, cableado y módulos de conversión). En esta fase se programó el firmware del Heltec T114 para gestionar el ciclo completo de adquisición: lectura de sensores, filtrado o calibración básica, empaquetado de datos con identificadores y marca de tiempo, y transmisión periódica hacia el gateway. De forma simultánea, se configuró la Raspberry Pi 4 como puerta de enlace, habilitando la recepción de tramas y la conexión a internet para el reenvío seguro de la telemetría.

La cuarta etapa correspondió a la implementación de supervisión y alertas mediante Amazon CloudWatch, orientada a convertir la telemetría en información accionable para el usuario. En esta fase se definieron umbrales operativos por variable (temperatura, humedad relativa, humedad del suelo e iluminancia) y se habilitó el envío de métricas hacia CloudWatch para su

monitoreo en paneles. A partir de dichas métricas se configuraron alarmas que se activan cuando una variable supera o cae por debajo del rango esperado, permitiendo notificar condiciones potencialmente críticas del microclima, como déficit de humedad del suelo o radiación elevada. Esta capa de supervisión se planteó como soporte al monitoreo continuo, reduciendo la necesidad de revisión manual constante y estableciendo una base escalable para futuras funciones de control automático.

En la etapa final se integró el sistema con AWS IoT Core para el registro, almacenamiento y visualización de datos, asegurando trazabilidad y disponibilidad para consulta remota. Se habilitó la administración remota mediante Tailscale, lo que permitió supervisar el gateway y dar mantenimiento sin intervención presencial en campo. La validación del prototipo se realizó mediante pruebas controladas y repetibles, evaluando consumo energético, estabilidad del enlace, alcance de transmisión y consistencia de mediciones. Con ello, se verificó el funcionamiento integral del sistema y su capacidad de mantener el monitoreo continuo en escenarios con limitaciones energéticas y de conectividad, dejando una base sólida para futuras ampliaciones orientadas a automatización más avanzada.

3. Pasos de la realización del prototipo

Este primer paso del proyecto muestra la preparación del Gateway inició con una instalación limpia del sistema operativo en una microSD, con el objetivo de evitar conflictos por configuraciones previas y asegurar un arranque estable. Para este proceso se utilizó Raspberry Pi Imager, herramienta oficial que permite grabar y configurar el sistema de forma controlada. Se seleccionó Raspberry Pi OS (64-bit), acorde al modelo Raspberry Pi 4, dejando el dispositivo listo para operar como nodo central de la red IoT, tal como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Instalación de Raspberry Pi Imager.

Una vez instalado el sistema, se realizó la configuración inicial del entorno para adaptarlo al contexto local de operación, estableciendo parámetros básicos como idioma, distribución de teclado, zona horaria y credenciales de acceso. Esta etapa permitió validar el funcionamiento general del sistema operativo, el acceso al escritorio y el comportamiento estable del entorno antes de integrar componentes de red y servicios. Con ello se aseguró que el gateway quede preparado para operar de manera continua y sin intervención constante.

Posteriormente, se configuró el enrutador que provee conectividad al gateway, ya que la Raspberry Pi requiere acceso a internet para reenviar los datos hacia la nube. Se aplicó una configuración básica con parámetros de seguridad, conexión mediante IP dinámica y modo de operación tipo Router Mode, garantizando enlace estable con el proveedor de internet y conectividad confiable para el sistema IoT. Esta etapa es clave porque un gateway sin conectividad limita la transmisión y el monitoreo remoto, tal como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Configuración del Router.

Con la conectividad operativa, se habilitó el acceso remoto mediante SSH, lo que permitió administrar la Raspberry Pi sin depender de una conexión física directa (monitor/teclado). La activación y verificación del servicio SSH se realizó para asegurar que el Gateway pueda ser gestionado en tareas de instalación, mantenimiento, revisión de scripts y solución de fallos. Esta capacidad de administración remota es fundamental cuando el sistema se despliega en zonas rurales y se requiere reducir desplazamientos, tal como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Acceso por SSH.

Para reforzar el acceso remoto seguro, se integró el servicio VPN mediante Tailscale, el cual permite vincular la Raspberry Pi a una red privada cifrada y acceder al gateway desde cualquier ubicación autorizada. Con esto se facilita la supervisión del estado del sistema, el mantenimiento y la administración del gateway incluso cuando se trabaja fuera de la red local. La lista de dispositivos conectados permite confirmar que la Raspberry Pi está correctamente enlazada y accesible dentro de la red privada, tal como se muestra en la figura 6.

Manage the devices connected to your tailnet. [Learn more](#)

Search by name, owner, tag, version...

2 machines

MACHINE	ADDRESSES
ihikari29 davs14.09.00@gmail.com	100.98.226.44
raspberrypi davs14.09.00@gmail.com	100.88.101.37

Figura c. Dispositivos conectados por Tailscale.

La integración con la nube se realizó utilizando AWS IoT Core como plataforma de gestión, almacenamiento y visualización. En esta fase se efectuó el registro en AWS, se generó el endpoint de conexión y se descargó el kit correspondiente para Raspberry Pi, el cual incluye certificados, claves y configuraciones necesarias para una comunicación segura. Este kit habilita el uso de MQTT con autenticación cifrada, asegurando que el envío de datos del gateway hacia la nube cumpla requisitos de seguridad, tal como se muestra en la figura 7.

Kit de conexión

<p>Certificado RPI4.cert.pem</p> <p>Script para enviar y recibir mensajes start.sh</p> <p>SDK para dispositivos con AWS IoT Python</p>	<p>Clave privada RPI4.private.key</p> <p>Política RPI4-Policy Ver política</p>
---	--

Descargar

Si lo ejecuta desde un navegador en el dispositivo, después de descargar el kit de conexión, estará en la carpeta de descarga del navegador.

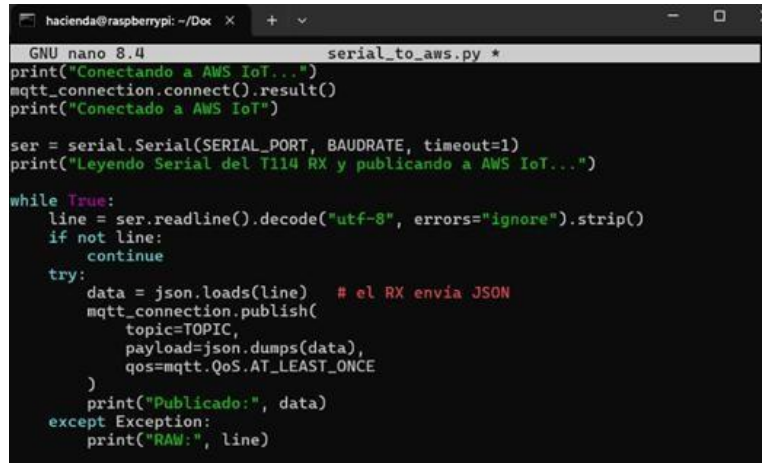
Si no lo está ejecutando desde un navegador en su dispositivo, tendrá que transferir el kit de conexión desde la carpeta de descarga de su navegador a su dispositivo utilizando el método que probó cuando preparó su dispositivo en el paso 1.

[Descargar kit de conexión](#)

Figura 7. Kit de conexión AWS.

Finalmente, se implementó el flujo completo de recepción y publicación de datos. El Gateway se programó para leer de manera continua la información proveniente del nodo receptor Heltec T114 (vía puerto serial), estructurarla en formato JSON y publicarla en AWS IoT Core mediante MQTT. La validación del funcionamiento se evidencia con la recepción del mensaje de telemetría, donde

se observan las variables ambientales y parámetros de enlace como RSSI y SNR, útiles para evaluar la calidad de la comunicación LoRa. Esta evidencia confirma la correcta integración entre nodos, gateway y la nube, garantizando el monitoreo continuo del sistema, tal como se muestra en la figura 8.



```

hacienda@raspberrypi: ~/Dox
GNU nano 8.4 serial_to_aws.py *
print("Conectando a AWS IoT...")
mqtt_connection.connect().result()
print("Conectado a AWS IoT")

ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUDRATE, timeout=1)
print("Leyendo Serial del T114 RX y publicando a AWS IoT...")

while True:
    line = ser.readline().decode("utf-8", errors="ignore").strip()
    if not line:
        continue
    try:
        data = json.loads(line) # el RX envia JSON
        mqtt_connection.publish(
            topic=TOPIC,
            payload=json.dumps(data),
            qos=mqtt.QoS.AT_LEAST_ONCE
        )
        print("Publicado:", data)
    except Exception:
        print("RAW:", line)
    
```

Figura 8. Interfaz AWS.

XII. Resultados

Datos obtenidos

En la tabla 1 presenta una selección de los registros ambientales más representativos obtenidos durante la jornada de monitoreo, considerando únicamente aquellos puntos donde se registraron cambios significativos en temperatura, iluminancia, humedad relativa o humedad del suelo. Esta reducción permite analizar el comportamiento del sistema sin redundancia de datos, manteniendo los eventos críticos que influyen directamente en el desarrollo del cultivo florícola. Se observa que los cambios más pronunciados ocurren durante las horas de mayor radiación solar, particularmente en la tarde, donde la iluminancia y la temperatura aumentan de forma conjunta, mientras que la humedad del suelo presenta variaciones abruptas asociadas a eventos de rehidratación o riego.

Tabla 1. Datos de las diferentes variables.

Hora	Temp (°C)	HR (%)	Lux	Humedad suelo (%)	Cambio/Evento
0G:00:00	26.6	78.3	0	68.7	Inicio de registro
10:00:00	26.4	78.5	0	69.3	Punto de control (1h)



10:08:50	26.5	76.4	0	69.2	HR -2.1%
10:1G:50	26.6	74.4	0	69.2	HR -2.0%
10:23:40	26.6	76.5	0	69.4	HR +2.1%
11:00:10	26.5	78.6	0	69.7	Punto de control (1h)
11:11:20	26.5	76.6	0	69.7	HR -2.0%
12:00:20	26.4	78.1	0	70.1	Punto de control (1h)
13:00:30	26.2	78.4	0	70.3	Punto de control (1h)
13:50:50	26.2	78.2	14	70.3	Lux +14
14:00:40	26.1	78.2	0	70.8	Punto de control (1h)
14:52:1G	25.9	80.7	0	71.2	Punto de control (1h)
15:00:40	25.9	80.7	0	71.2	Punto de control (1h)
15:12:5G	25.9	80.6	14	71.0	Lux +14
15:16:4G	25.9	80.6	6	70.9	Lux -8
16:00:20	26.2	80.4	616	69.3	Lux +610
16:16:40	26.5	80.0	1221	69.2	Lux +605
16:28:10	26.9	78.9	681	68.9	Suelo -2.7%
16:28:20	26.9	78.8	1657	68.6	Lux +976
16:34:50	27.1	77.8	2304	68.0	Lux +647
16:38:00	27.3	77.1	2909	67.9	Lux +605
16:47:30	27.8	75.9	3388	67.7	T +0.5° C
16:55:00	28.2	74.8	3807	67.8	T +0.4° C
17:04:50	28.6	73.0	4419	67.8	Lux +612
17:10:10	28.7	72.4	4970	67.7	Punto de control (1h)
17:18:10	28.8	71.8	5584	67.7	Lux +614
17:26:50	29.0	70.7	6195	68.1	Lux +611
17:33:00	29.4	69.8	6582	67.8	T +0.4° C
17:3G:20	29.6	69.1	7189	68.2	Lux +607
17:45:10	29.0	70.1	8274	68.3	Lux +1085
17:50:10	28.8	70.9	7989	70.7	Suelo +2.0%
17:53:20	29.2	69.7	7859	73.3	Suelo +2.6%

17:53:50	29.1	69.2	7839	75.4	Suelo +2.1%
17:54:00	29.2	69.1	7835	78.6	Suelo +3.2%
17:54:20	29.1	69.1	7831	76.0	Suelo -2.6%
17:56:00	28.8	68.6	7774	79.4	Suelo +3.4%
17:56:20	28.7	68.8	7750	74.8	Suelo -4.6%
18:00:00	28.4	69.3	7601	75.1	Punto de control (1h)
18:07:00	28.1	69.9	7411	75.4	Punto final del registro

En la figura 9 muestra una tendencia ascendente clara de la temperatura conforme avanza el día, pasando de valores cercanos a 26 °C en la mañana hasta picos cercanos a 29.6 °C en la tarde. Este comportamiento está directamente relacionado con el incremento de la radiación solar y confirma que el sistema IoT es capaz de capturar cambios térmicos graduales sin pérdidas de información. Desde el punto de vista agronómico, estos valores se mantienen dentro de rangos aceptables para el cultivo de rosas, aunque cercanos al límite superior en horas críticas, lo que refuerza la utilidad del monitoreo continuo.

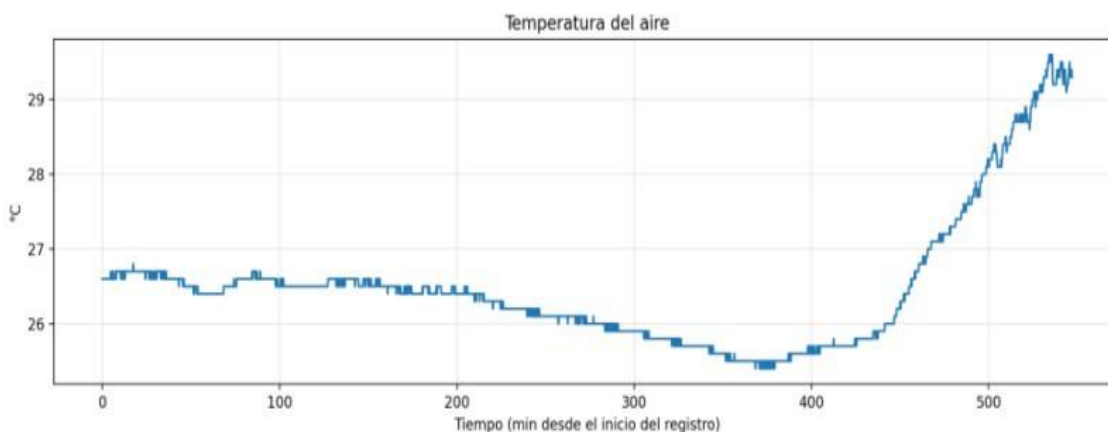


Figura 5. Grafica de Temperatura vs Hora.

La figura 10 presenta la variación de la humedad relativa del aire durante el mismo intervalo de monitoreo. Se observa un comportamiento típicamente inverso al de la temperatura: a medida que la temperatura aumenta, la humedad relativa tiende a disminuir. Esta relación es esperable en entornos agrícolas debido a la dependencia física entre ambas variables, y refleja la respuesta del microclima conforme se intensifica la radiación. El seguimiento de este parámetro resulta relevante para la floricultura, ya que niveles de humedad muy

bajos pueden favorecer estrés hídrico y afectar la calidad del cultivo, mientras que valores excesivos pueden promover condiciones de hongos o enfermedades.

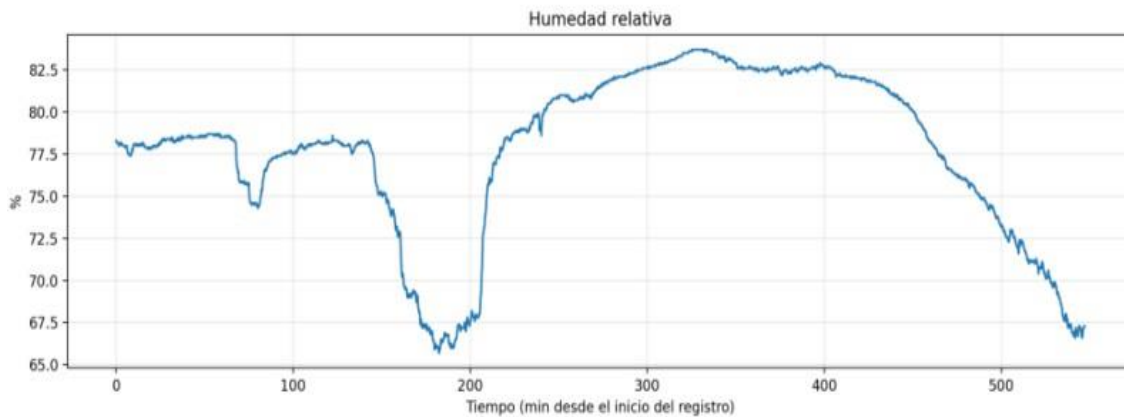


Figura 10. Gráfica de humedad relativa vs hora.

La figura 11 ilustra el comportamiento de la iluminancia (lux) registrada por el sensor de luz, evidenciando la variable con mayor cambio relativo durante la jornada. En los eventos seleccionados se aprecia un incremento marcado de lux durante la tarde, lo que representa una mayor incidencia de radiación solar en el área de monitoreo. Esta información es clave porque la radiación no solo afecta directamente el desarrollo del cultivo, sino que también explica incrementos simultáneos en temperatura y variaciones en la humedad relativa. En consecuencia, los datos de lux permiten identificar periodos críticos donde puede ser necesario aplicar medidas de protección como sombreado, ajuste de ventilación o monitoreo más estricto de humedad de suelo.

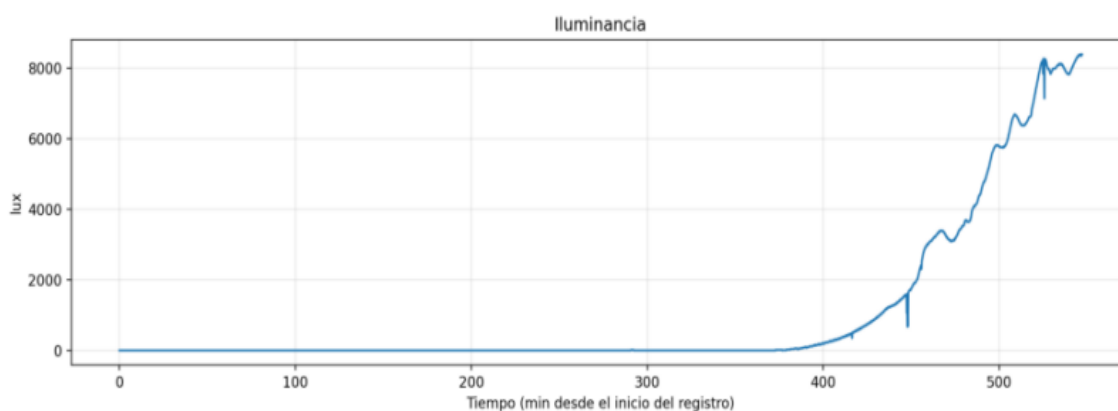


Figura 11. Gráfica de Iluminancia vs hora.

En relación con la disponibilidad hídrica del sustrato, la figura 12 muestra la evolución de la humedad del suelo a lo largo del periodo analizado. La tendencia general se mantiene relativamente estable durante una parte considerable del registro, con descensos graduales atribuibles a evaporación y absorción por la planta. Sin embargo, hacia el final del periodo se observan incrementos abruptos de la humedad, seguidos por variaciones inmediatas, lo que sugiere un evento de rehumectación asociado a riego o a una intervención directa sobre el sustrato. Este comportamiento confirma que el sensor capacitivo y el sistema IoT son capaces de detectar cambios rápidos, lo cual es esencial para validar la efectividad del riego y reducir riesgos de déficit o exceso de agua.

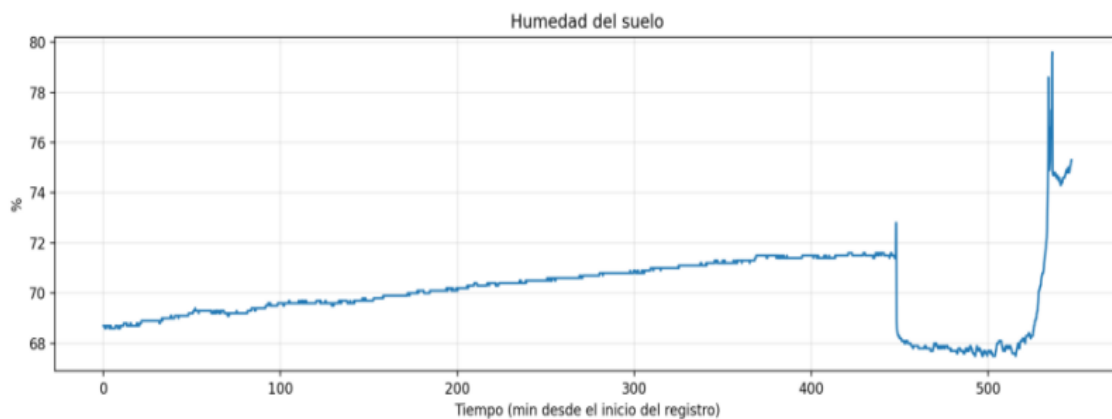


Figura 12. Gráfica humedad del suelo vs hora.

La Tabla 2 resume los valores mínimos, máximos y observaciones relevantes de las variables monitoreadas, permitiendo comparar su amplitud de cambio durante la jornada. Se evidencia que la iluminancia presenta la mayor variabilidad, mientras que la temperatura muestra incrementos progresivos coherentes con el ciclo solar. La humedad relativa, por su parte, tiende a disminuir conforme se incrementa la temperatura, mientras que la humedad del suelo mantiene cambios moderados con eventos abruptos localizados. Este resumen confirma que el sistema de sensado responde de manera consistente y que el prototipo captura información útil para caracterizar el microclima de un entorno florícola real.

Tabla 2. Resumen de valores mínimos y máximos.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Observación relevante
----------	--------------	--------------	-----------------------

Temperatura (°C)	26.1	29.6	Incremento progresivo en horas de alta radiación
Humedad relativa (%)	67.7	80.4	Descenso asociado al aumento térmico
Iluminancia (lux)	673	8218	Incremento brusco en horas de la tarde
Humedad del suelo (%)	68.6	79.4	Variaciones abruptas por rehumectación

La Tabla 3 organiza los principales eventos críticos identificados durante el monitoreo, vinculando el instante aproximado del cambio con la variable dominante y su interpretación operativa. Esta clasificación permite transformar datos continuos en información práctica para el usuario final, ya que facilita reconocer momentos donde el ambiente se vuelve más exigente para el cultivo, como aumentos fuertes de radiación o picos térmicos. Además, el evento identificado como rehumectación confirma que el sistema puede registrar respuestas del sustrato ante riego, lo que abre la posibilidad de validar rutinas de irrigación y ajustar umbrales de control. En conjunto, estos eventos demuestran que la red IoT no solo adquiere datos, sino que permite interpretar dinámicas relevantes en un escenario agrícola.

Tabla 3. Identificación de eventos críticos.

Evento	Variable dominante	Hora aproximada	Interpretación
Inicio de radiación intensa	Iluminancia	~16:00	Exposición solar directa
Pico térmico	Temperatura	~17:30	Máxima carga térmica
Evento de riego	Humedad del suelo	~17:50	Rehidratación del sustrato

Ajuste postriego	Humedad del ~17:56	Drenaje
	suelo	redistribución

1.1 Ecuaciones a utilizar

Para complementar el análisis de temperatura y humedad relativa, se calculó el Déficit de Presión de Vapor (VPD), un indicador que integra ambas variables y permite estimar la demanda evaporativa del ambiente. Este parámetro es útil en monitoreo agrícola porque resume el efecto combinado de un aumento de temperatura y una disminución de humedad, condiciones que incrementan la transpiración y el consumo hídrico de las plantas. En este estudio, el VPD se utilizó como métrica derivada para interpretar el microclima registrado por la red IoT y relacionarlo con eventos de radiación y variaciones de humedad del suelo.

El cálculo del VPD se realizó a partir de la presión de vapor de saturación (e_s) y la presión de vapor real (e_a), mediante:

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)$$

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \times 29.6}{29.6 + 237.3}\right)$$

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp(1.915) = 0.6108 \times 6.78 = 4.14 \text{ kPa}$$

$$e_a = e_s \cdot \frac{RH}{100}$$

$$e_a = 4.14 \cdot \frac{69.1}{100} = 2.86 \text{ kPa}$$

$$VPD = e_s - e_a$$

$$VPD = 4.14 - 2.86 = 1.28 \text{ kPa}$$

Este valor refleja un ambiente con demanda evaporativa moderada–alta, típico de periodos con mayor temperatura y menor humedad relativa.

La Gráfica 5 evidencia que el VPD tiende a incrementarse durante las franjas horarias donde se registran mayores valores de temperatura e iluminancia, lo cual confirma que el microclima se vuelve progresivamente más exigente para el

cultivo a medida que aumenta la radiación solar. Esta tendencia permite interpretar de forma integrada la relación entre temperatura y humedad relativa, evitando analizar ambas variables por separado. En términos operativos, los periodos con VPD más alto pueden considerarse ventanas de mayor demanda hídrica, donde resulta más relevante vigilar la humedad del suelo y evaluar estrategias de riego o manejo de microclima (por ejemplo, ventilación o sombreado) para reducir estrés en el cultivo.

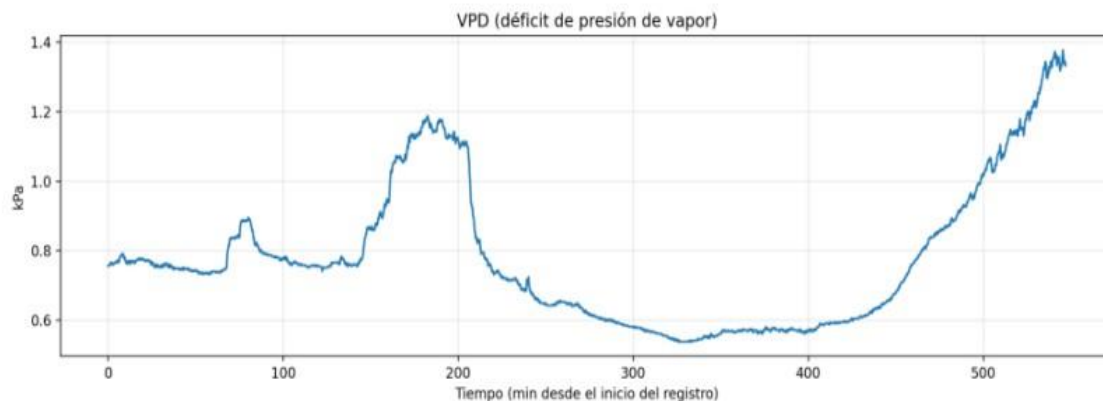


Figura 13. Déficit de presión de vapor vs hora.

XIII. Discusión

Los resultados del prototipo reflejan un comportamiento micro climático coherente con condiciones reales de cultivo, donde la radiación solar actúa como principal variable explicativa de los cambios térmicos y de la reducción de humedad relativa en horas críticas. Este patrón nos asegura que el sistema es capaz de captar los cambios dinámicos del microclima, correlacionando directamente radiación, temperatura del aire y humedad relativa del aire y suelo. La tendencia ascendente de temperatura y los picos de iluminancia observados durante la tarde sugieren ventanas de mayor carga ambiental que pueden influir en transpiración y, por extensión, en la demanda hídrica del cultivo. Su enfoque permite anticipar escenarios de estrés térmicos y toma de decisiones preventivas a la producción. La disponibilidad de registros continuos permite al productor identificar periodos de mayor riesgo y ajustar prácticas de manejo, especialmente en cultivos sensibles como la floricultura, donde el microclima impacta directamente en calidad. Esto demuestra cuan importante es el uso de

estas herramientas a especies ornamentales, donde un cambio fuera de los rangos óptimos puede incidir en el cambio del tamaño, coloración y vida postcosecha.

La respuesta de la humedad del suelo, con estabilidad general y eventos puntuales de incremento, se interpreta como evidencia de que el sistema es capaz de detectar cambios operativamente relevantes, como rehumectación asociada a riego o intervención directa. Las lecturas sugieren una adecuada interacción entre sensor y sustrato, lo que fortalece la confiabilidad del prototipo. Esto aporta una ventaja frente al control manual, ya que permite verificar si el riego produce el efecto esperado y si el sustrato retorna a un estado estable después del evento. Además, el cálculo de VPD refuerza la interpretación del microclima al integrar temperatura y humedad relativa, permitiendo identificar momentos donde el ambiente incrementa su demanda evaporativa. El uso del VPD facilita una lectura más técnica del riesgo de estrés hídrico a lo largo del tiempo. En términos prácticos, esto sugiere que la combinación de humedad de suelo y VPD podría convertirse en una base sólida para reglas de decisión simples orientadas a riego o manejo del microclima en futuras ampliaciones del sistema. De esta manera, el prototipo no solo cumple fielmente con su objetivo, sino que sienta bases para una futura automatización inteligente que cumpla con umbrales dinámicos con menor tiempo de reacción ante cambios climáticos.

En relación con la arquitectura tecnológica, el uso de LoRa/LoRaWAN se considera apropiado para entornos rurales por su bajo consumo y capacidad de comunicación a larga distancia, lo cual es consistente con tendencias recientes en agricultura inteligente. La elección principalmente corresponde a criterios de eficiencia y bajo costo. Asimismo, la integración mediante gateway y nube favorece la escalabilidad y la disponibilidad histórica de datos, mientras que el acceso remoto mejora la mantenibilidad sin requerir presencia física constante. Permitirá cumplir a la construcción de bases de datos de series temporales extensas, usadas para el análisis comparativo entre distintas estaciones junto a evaluación de patrones con mayor efectividad de cultivo. Sin embargo, también se reconoce que la generalización a campo requiere controlar factores como instalación del sensor, exposición directa al sol, calibración de humedad del suelo según sustrato y ampliación del despliegue a varios puntos de medición

para capturar variabilidad espacial. La variabilidad microclima dentro de un invernadero, por lo que puede generar diferencias significativas, por lo que se recomienda tomar más de un solo punto de referencia para registrar su comportamiento global del cultivo.

Como limitaciones principales se consideran la dependencia de condiciones puntuales del entorno durante el periodo de prueba, la necesidad de calibración específica para convertir lecturas de humedad del suelo en valores comparables entre fincas y la ausencia de una automatización completa del riego.

Como trabajo futuro se recomienda ampliar el número de nodos para cubrir diferentes zonas del cultivo, definir umbrales agronómicos por variedad, incorporar validación en campo por periodos más largos y formalizar reglas de decisión basadas en indicadores combinados (humedad del suelo y VPD). Los resultados respaldan la viabilidad de una red IoT energéticamente eficiente con respaldo solar para sostener monitoreo continuo en floricultura ecuatoriana, reduciendo dependencia de la red eléctrica y facilitando toma de decisiones basada en datos.

En el artículo [31] se diseñó de un sistema de intercomunicación de emergencia vehicular utilizando circuitos electrónicos y sensores, el cual presenta el desarrollo de un sistema embebido que integra sensores de proximidad/ultrasónicos y un módulo GSM para detectar eventos críticos y activar alertas automáticas. El trabajo reporta que las caídas pueden detectarse con 95% de precisión, en un rango operativo de 2 a 100 cm, y con un tiempo de respuesta promedio de 1,2 s, lo que evidencia la importancia de medir desempeño con métricas cuantificables y orientadas a tiempo real. La incorporación de indicadores numéricos fortalece a la fácil visualización, permite comparar objetivamente su desempeño frente a la toma de soluciones. En retrospectiva con una red IoT para floricultura, estos resultados sirven como referencia metodológica: así como en seguridad vial la utilidad depende de reaccionar con rapidez, en monitoreo ambiental agrícola la utilidad depende de capturar y transportar datos de forma oportuna y continua, evitando vacíos que afecten la toma de decisiones. En ambos casos, se sustenta que la estabilidad del enlace de comunicación es precisa en diferentes distancias de trabajo.

La comparación se centra en la confiabilidad del sistema en entornos reales, el artículo identifica limitaciones fuera del rango de operación, con distancias mínimas entre 0,02 y 1,96 cm y máximas entre 151,36 y 177,72 cm, lo que muestra que la precisión y estabilidad dependen de condiciones físicas y deben validarse experimentalmente. En una red IoT florícola, una lógica equivalente aplica al desempeño del enlace LoRa/LoRaWAN y a la continuidad del registro: no basta con “medir”, sino que se deben evaluar rangos, estabilidad y fallos para asegurar datos útiles. Por lo tanto, la evaluación del prototipo debería incluir métricas porcentuales que validen la recepción de los paquetes y tiempo promedio entre transmisión. Por ello, el aporte del artículo se refleja en la forma de sustentar resultados con porcentajes (95%) y tiempos (1,2 s), enfoque que se alinea con la necesidad de tu tesis de reportar estabilidad de monitoreo, tolerancia a fallos energéticos y continuidad de datos en campo.

XIV. Conclusiones

Se diseñó e implementó una red IoT de monitoreo ambiental para floricultura, basada en nodos con sensores (temperatura/humedad del aire, humedad del suelo e iluminancia), comunicación LoRa/LoRaWAN y un gateway con envío a la nube, logrando captura y consulta remota continua de telemetría en condiciones acordes a un entorno rural.

La integración de panel solar y baterías permitió sostener la operación del sistema ante intermitencias eléctricas, aportando independencia de la red y continuidad en el registro de datos, lo cual es clave para evitar pérdidas de información y mantener trazabilidad del microclima.

Los datos obtenidos evidenciaron variaciones coherentes entre lux, temperatura, humedad relativa y humedad del suelo; además, el uso de indicadores derivados como VPD y la supervisión con CloudWatch facilitó identificar periodos críticos y generar alertas cuando los parámetros se apartaron de rangos establecidos, mejorando el soporte a la toma de decisiones.

XV. Recomendaciones

Se recomienda reforzar la puesta en marcha del prototipo mediante criterios de instalación orientados a operación prolongada en ambientes agrícolas. Es

fundamental adoptar un enfoque de ingeniería preventiva que ayude a preservar el prototipo ya que permanecerá dentro de condiciones reales de campo, como alta humedad, variaciones térmicas, presencia de agroquímicos y manipulación de personal. Esto incluye el uso de cajas estancas (grado IP) para proteger electrónica y conexiones frente a humedad, polvo y exposición solar directa, así como la correcta fijación mecánica de sensores, antenas y cableado para evitar falsos contactos por vibración o manipulación. Asimismo, se sugiere emplear prensaestopas que permanezcan selladas con silicona para minimizar la condensación del área, especialmente en invernaderos con riego automatizado por aspersión.

También es conveniente estandarizar la ubicación de los sensores: por ejemplo, montar el sensor de temperatura/humedad en un punto ventilado y protegido de radiación directa (tipo “escudo” o garita), y ubicar el sensor de humedad del suelo a una profundidad constante y representativa del bulbo húmedo del riego. La homogeneidad en la instalación entre nodos permite que sean comparables, mejorando la validez técnica de los datos frente a un único punto. Adicionalmente, se sugiere documentar en un protocolo de instalación los pasos de montaje, orientación del panel solar, limpieza preventiva y verificación periódica (batería, conectores, lectura base), de manera que el sistema mantenga estabilidad de medición y reduzca fallos durante despliegues prolongados en haciendas florícolas. Adicionalmente, un registro que ayude al mantenimiento preventivo de cada nodo a lo largo del tiempo, lo que facilita el óptimo desempeño del sistema.

Se recomienda mejorar la capa de monitoreo incorporando alarmas más completas y trazables en CloudWatch, incluyendo no solo variables ambientales, sino también métricas de calidad del enlace (RSSI/SNR), estado de batería/voltaje y tasa de recepción de mensajes. Esto permite detectar fallos antes de que afecten el monitoreo (por ejemplo, caída de un nodo, degradación de señal o batería baja). También es recomendable integrar mediante Amazon reglas por condiciones combinadas.

Referencias

- [1] I. Guaita-Pradas, L. O. Rodríguez-Mañay, and I. Marques-Perez, “Competitiveness of Ecuador’s Flower Industry in the Global Market in the Period 2016-2020,” *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 5821, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15075821.
- [2] A. Betancourt Espinoza, S. N. Tuz Gia, and V. E. Salcedo Muñoz, “Sector florícola: Contribución al desarrollo socioeconómico del Ecuador, 2015 - 2024,” *GADE: Revista Científica*, vol. 5, no. 1, pp. 755-778, Jul. 2025, doi: 10.63549/rg.v5i1.653.
- [3] K. Guallasamin Constante and D. Simón-Baile, “Huella de carbono del cultivo de rosas en Ecuador comparando dos metodologías: GHG Protocol vs. PAS 2050/ Carbon footprint of the cultivation of roses in Ecuador comparing two methodologies: GHG Protocol vs. PAS 2050,” *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, no. 24, pp. 27-56, Sep. 2018, doi: 10.17141/letrasverdes.24.2018.3091.
- [4] “Experimental Study on Cultivation Model of High-stem Rose in High Altitude Area,” *Agricultural & Forestry Economics and Management*, vol. 7, no. 1, 2024, doi: 10.23977/agrfem.2024.070115.
- [5] S. N. Kumar, K. Suriyan, A. T. Jacob, A. Varghese, and E. Francis, “Smart farming for a sustainable future: implementing IoT-based systems in precision agriculture,” *Bull Natl Res Cent*, vol. 49, no. 1, p. 71, Oct. 2025, doi: 10.1186/s42269-025-01366-8.
- [6] H. Jawad, R. Nordin, S. Gharghan, A. Jawad, and M. Ismail, “Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review,” *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1781, Aug. 2017, doi: 10.3390/s17081781.
- [7] M. Minea, “Cellular – Sensorless V2I – based traffic information and communications infrastructure: Case study for high class motorways,” in *2017 5th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, IEEE, Jun. 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/ECAI.2017.8166418.
- [8] E. Artetxe, O. Barambones, I. Martín Toral, J. Uralde, I. Calvo, and A. del Rio, “Smart IoT Irrigation System Based on Fuzzy Logic, LoRa, and Cloud Integration,” *Electronics (Basel)*, vol. 13, no. 10, p. 1949, May 2024, doi: 10.3390/electronics13101949.
- [9] Z. Xu, X. Wang, and Y. Deng, “Rotating Focused Field Eddy-Current Sensing for Arbitrary Orientation Defects Detection in Carbon Steel,” *Sensors*, vol. 20, no. 8, p. 2345, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20082345.
- [10] M. Dhanaraju, P. Chenniappan, K. Ramalingam, S. Pazhanivelan, and R. Kaliaperumal, “Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture,” *Agriculture*, vol. 12, no. 10, p. 1745, Oct. 2022, doi: 10.3390/agriculture12101745.
- [11] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E.-H. M. Aggoune, “Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551-129583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932609.

- [12] H. Jawad, R. Nordin, S. Gharghan, A. Jawad, and M. Ismail, "Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1781, Aug. 2017, doi: 10.3390/s17081781.
- [13] S. V. Gaikwad, A. D. Vibhute, K. V. Kale, and S. C. Mehrotra, "An innovative IoT based system for precision farming," *Comput Electron Agric*, vol. 187, p. 106291, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106291.
- [14] H. Huh and J. Y. Kim, "LoRa-based Mesh Network for IoT Applications," in *2015 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, IEEE, Apr. 2019, pp. 524-527. doi: 10.1109/WF-IoT.2019.8767242.
- [15] Chong Peng Lean, Gophinath Krishnan, Chen Li, Kong Feng Yuan, Ng Poh Kiat, and M. R. Basir Khan, "A Raspberry Pi-Powered IoT Smart Farming System for Efficient Water Irrigation and Crop Monitoring," *Malaysian Journal of Science and Advanced Technology*, pp. 149-158, Mar. 2024, doi: 10.56532/mjsat.v4i2.295.
- [16] A. Simo, S. Dzitac, G. E. Badea, and D. Meianu, "Smart Agriculture: IoT-based Greenhouse Monitoring System," *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS & CONTROL*, vol. 17, no. 6, Dec. 2022, doi: 10.15837/ijccc.2022.6.5039.
- [17] R. Singh, M. Aernouts, M. De Meyer, M. Weyn, and R. Berkvens, "Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 1827, Mar. 2020, doi: 10.3390/s20071827.
- [18] A. Beyaz and V. Gül, "Determination of Low-Cost Arduino Based Light Intensity Sensors Effectiveness for Agricultural Applications," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 65, 2022, doi: 10.1590/1678-4324-2022220172.
- [19] P. Petrashin, W. Lancioni, and J. Castagnola, "A Novel 350 MHz Capacitive Soil Moisture Sensor for Precision Agriculture," *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, vol. 9, no. 2, Aug. 2025, doi: 10.12962/jaree.v9i2.455.
- [20] R. Hinojosa-Meza, E. Olvera-Gonzalez, N. Escalante-Garcia, J. A. Dena-Aguilar, M. Montes Rivera, and P. Vacas-Jacques, "Cost-Effective and Portable Instrumentation to Enable Accurate pH Measurements for Global Industry 4.0 and Vertical Farming Applications," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, p. 7038, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12147038.
- [21] Md. R. Al Mamun, A. K. Ahmed, S. M. Upoma, M. Haque, and M. Ashik-E-Rabbani, "IoT-enabled solar-powered smart irrigation for precision agriculture," *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, p. 100773, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100773.
- [22] S. Khernane, S. Bouam, and C. Arar, "Renewable Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture," *International Journal of Networked and Distributed Computing*, vol. 12, no. 1, pp. 8-16, Jun. 2024, doi: 10.1007/s44227-023-00017-6.
- [23] P. Arregocés-Guerra, J. F. Restrepo-Arias, M. Usme Martinez, J. P. Montoya-Yepes, and J. W. Branch-Bedoya, "Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0," *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 24, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853.

- [24] J. P. Tovar Soto, C. F. Pareja Figueredo, O. L. García Navarrete, and L. C. Gutiérrez Martínez, “Performance evaluation of LoRa technology for agricultural applications in rural areas,” *Dyna (Medellin)*, vol. 88, no. 216, pp. 69-78, Feb. 2021, doi: 10.15446/dyna.v88n216.88258.
- [25] P. Rajak, A. Ganguly, S. Adhikary, and S. Bhattacharya, “Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges,” *J Agric Food Res*, vol. 14, p. 100776, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jafr.2023.100776.
- [26] C. Dai and Z. Xu, “A secure three-factor authentication scheme for multi-gateway wireless sensor networks based on elliptic curve cryptography,” *Ad Hoc Networks*, vol. 127, p. 102768, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.adhoc.2021.102768.
- [27] B. Kang and H. Choo, “An experimental study of a reliable IoT gateway,” *ICT Express*, vol. 4, no. 3, pp. 130-133, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.icte.2017.04.002.
- [28] H. Sharma, A. Haque, and Z. A. Jaffery, “Maximization of wireless sensor network lifetime using solar energy harvesting for smart agriculture monitoring,” *Ad Hoc Networks*, vol. 94, p. 101966, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101966.
- [29] M. Alharbi and H. A. Karimi, “A Global Path Planner for Safe Navigation of Autonomous Vehicles in Uncertain Environments,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6103, Oct. 2020, doi: 10.3390/s20216103.
- [30] Y.-W. Chan, E. Kristiani, H. Fathoni, C.-Y. Chen, and C.-T. Yang, “A smart edge computing infrastructure for air quality monitoring using LPWAN and MQTT technologies,” *J Supercomput*, vol. 80, no. 7, pp. 9961-9985, May 2024, doi: 10.1007/s11227-023-05837-5.

XVI. Anexos

Anexo 1

Código de módulo Heltec T114 Transmisor

El anexo 1 contiene el código correspondiente al nodo transmisor de la red IoT. Este módulo será el responsable del muestreo de variables ambientales mediante sensores de temperatura y humedad del aire, iluminancia y humedad del suelo. El microcontrolador realiza el procesamiento de datos y los mostrará en su pantalla, a su vez integrará transmisión inalámbrica de la información mediante tecnología LoRa en la banda 915 MHz. El código también realiza gestión de consumo energético y envió de datos sincronizados al nodo receptor.

```
#include <Arduino.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <Adafruit_TinyUSB.h>
```

```
#include "heltec_nrf_lorawan.h"
```

```
#include <Adafruit_GFX.h>
```

```
#include <Adafruit_ST7789.h>
```

```
#include <Adafruit_SHT31.h>
```

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
```

```
#include <Adafruit_TSL2561_U.h>
```

```
#include <Adafruit_ADS1X15.h>
```

```
// ===== DISPLAY =====
```

```
Adafruit_ST7789 tft(&SPI1, PIN_TFT_CS, PIN_TFT_DC, PIN_TFT_RST);
```

```
// ===== I2C =====
```

```
#define I2C_SDA_PIN 13
```

```
#define I2C_SCL_PIN 16
```

```
#define SHT31_ADDR 0x44
```

```
#define ADS_SOIL_ADDR 0x48
```

```
#define TSL2561_ADDR TSL2561_ADDR_FLOAT
```

```
#define SOIL_CH 0
```

```
const float SOIL_V_DRY = 2.00f;
```

```
const float SOIL_V_WET = 0.77f;
```

```
Adafruit_SHT31 sht31;
```

```
Adafruit_TSL2561_Unified tsl(TSL2561_ADDR, 12345);
```

```
Adafruit_ADS1115 adsSoil;
```

```
static inline float clampf(float x, float lo, float hi){ return (x < lo) ? lo : (x > hi) ? hi :  
x; }
```

```
static float soilPercentFromVoltage(float v) {
```

```
    float denom = (SOIL_V_DRY - SOIL_V_WET);
```

```
    if (fabs(denom) < 0.0001f) return NAN;
```

```
    return clampf((SOIL_V_DRY - v) * 100.0f / denom, 0.0f, 100.0f);
```

```
}
```

```
static void setupI2C_T114() {
```

```
    Wire.setPins(I2C_SDA_PIN, I2C_SCL_PIN);
```

```
    Wire.begin();
```

```
}
```

```
// ===== BATERIA =====
```

```
const float VREF = 3.30f;
```

```
const float VBAT_MULT = 4.80f;
```

```
const int ADC_BITS = 12;

const int ADC_MAX = (1 << ADC_BITS) - 1;

static float readBatteryPercent(int samples = 12) {

    pinMode(PIN_BAT_ADC_CTL, OUTPUT);

    digitalWrite(PIN_BAT_ADC_CTL, HIGH);

    delay(3);

    long sum = 0;

    for (int i = 0; i < samples; i++) { sum += analogRead(PIN_BAT_ADC); delay(2);
}

    digitalWrite(PIN_BAT_ADC_CTL, LOW);

    float raw = sum / (float)samples;

    float v_adc = (raw * VREF) / (float)ADC_MAX;

    float v_bat = v_adc * VBAT_MULT;

    return clampf((v_bat / 4.2f) * 100.0f, 0.0f, 100.0f);
}

// ===== LORA =====

#define RF_FREQUENCY      91500000

#define TX_OUTPUT_POWER   5

#define LORA_BANDWIDTH    0
```

```
#define LORA_SPREADING_FACTOR 7

#define LORA_CODINGRATE    1

#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8

#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0

#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false

#define LORA_IQ_INVERSION_ON false

#define BUFFER_SIZE 48

char txpacket[BUFFER_SIZE];

static RadioEvents_t RadioEvents;

typedef enum { LOWPOWER, STATE_TX } States_t;

States_t state = LOWPOWER;

volatile bool txBusy = false;

bool sendPending = false;

// ===== Serial --> LoRa manual =====

char inbuf[BUFFER_SIZE];

uint8_t inlen = 0;

bool manualPending = false;

char manualPacket[BUFFER_SIZE];

// ===== TIMERS =====
```

```
unsigned long lastTelemetryMs = 0;
```

```
unsigned long lastSerialMs = 0;
```

```
// Transmision cada 1s
```

```
const unsigned long TELEMETRY_PERIOD_MS = 1000; // sensores + pantalla  
+ LoRa
```

```
const unsigned long SERIAL_PERIOD_MS = 1000; // debug por Serial cada  
1s
```

```
// ===== VALORES =====
```

```
float airTempC=NAN, airHum=NAN, lux=NAN, soilV=NAN, soilPct=NAN,  
batPct=NAN;
```

```
int batPctInt = -1;
```

```
// ===== DISPLAY UI =====
```

```
static void tftPowerOn() {
```

```
    pinMode(PIN_TFT_VDD_CTL, OUTPUT);    digitalWrite(PIN_TFT_VDD_CTL,  
0);
```

```
    pinMode(PIN_TFT_LEDA_CTL, OUTPUT); digitalWrite(PIN_TFT_LEDA_CTL,  
0);
```

```
tft.init(135, 240);
```

```
tft.setRotation(3);
```

```
tft.setSPISpeed(40000000);
```

```
tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
```

```
tft.setTextWrap(false);
```

```
tft.setTextSize(2);

tft.setCursor(5, 5);

tft.setTextColor(ST77XX_ORANGE);

tft.print("T114 Sensores");

tft.setTextSize(1);

tft.setCursor(170, 10);

tft.setTextColor(ST77XX_GREEN);

tft.print("LoRa TX");

tft.drawFastHLine(0, 30, tft.width(), ST77XX_ORANGE);
}

static void drawValues() {

tft.fillRect(0, 35, tft.width(), 100, ST77XX_BLACK);

tft.setTextSize(1);

tft.setCursor(5, 35);

tft.setTextColor(ST77XX_CYAN); tft.print("AIR T:");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);

if (isnan(airTempC)) tft.print("NaN"); else { tft.print(airTempC, 1); tft.print("C"); }

tft.setCursor(5, 50);
```

```
tft.setTextColor(ST77XX_CYAN); tft.print("AIR H:");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);

if (isnan(airHum)) tft.print("NaN"); else { tft.print(airHum, 1); tft.print("%"); }

tft.setCursor(5, 65);

tft.setTextColor(ST77XX_YELLOW); tft.print("LUX :");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);

if (isnan(lux)) tft.print("NaN"); else { tft.print(lux, 0); tft.print("lx"); }

tft.setCursor(5, 80);

tft.setTextColor(ST77XX_GREEN); tft.print("SOIL:");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);

if (isnan(soilPct) || isnan(soilV)) tft.print("NaN");

else { tft.print(soilPct, 0); tft.print("% "); tft.print(soilV, 2); tft.print("V"); }

tft.setCursor(5, 118);

tft.setTextColor(ST77XX_BLUE); tft.print("BAT ");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE);

if (batPctInt < 0) tft.print("NaN"); else tft.print(batPctInt);

tft.print("%");

tft.setCursor(120, 118);

tft.setTextColor(ST77XX_GREEN); tft.print("TX ");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); tft.print(txBusy ? "...": "OK");
```

}

```
// ===== Setup =====
```

```
void setup() {
```

```
  boardInit(LORA_DEBUG_ENABLE, LORA_DEBUG_SERIAL_NUM, 115200);
```

```
  Serial.begin(115200);
```

```
  analogReadResolution(12);
```

```
  pinMode(PIN_BAT_ADC_CTL, OUTPUT);
```

```
  digitalWrite(PIN_BAT_ADC_CTL, LOW);
```

```
  tftPowerOn();
```

```
  setupI2C_T114();
```

```
  if (!sht31.begin(SHT31_ADDR)) Serial.println("SHT31 not found");
```

```
  if (!tsl.begin()) Serial.println("TSL2561 not found");
```

```
  else {
```

```
    tsl.enableAutoRange(true);
```

```
    tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS);
```

```
  }
```

```
  if (!adsSoil.begin(ADS_SOIL_ADDR)) Serial.println("ADS1115 (soil) not  
found");
```

```
  else adsSoil.setGain(GAIN_TWO);
```

```

RadioEvents.TxDone = [](){ txBusy = false; };

RadioEvents.TxTimeout = [](){ Radio.Sleep(); txBusy = false; };

Radio.Init(&RadioEvents);

Radio.SetChannel(RF_FREQUENCY);

Radio.SetTxConfig(MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0,
LORA_BANDWIDTH,
LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE,
LORA_PREAMBLE_LENGTH,
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON, true, 0, 0,
LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000);

Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH,
LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE, 0,
LORA_PREAMBLE_LENGTH, LORA_SYMBOL_TIMEOUT,
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
0, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, true);

txpacket[0] = '\0';
}

// ===== Loop =====

void loop() {

// 1) Serial -> paquete manual

while (Serial.available()) {

```

```
char c = (char)Serial.read();

if (c == '\r') continue;

if (c == '\n') {
    inbuf[inlen] = '\0';
    strncpy(manualPacket, inbuf, BUFFER_SIZE);
    manualPacket[BUFFER_SIZE - 1] = '\0';
    manualPending = true;
    inlen = 0;
} else if (inlen < (BUFFER_SIZE - 1)) {
    inbuf[inlen++] = c;
}
}

unsigned long now = millis();

// 2) Telemetría + pantalla + LoRa cada 1s
if (now - lastTelemetryMs >= TELEMETRY_PERIOD_MS) {
    lastTelemetryMs = now;

    airTempC = sht31.readTemperature();
    airHum = sht31.readHumidity();

    sensors_event_t event;
```

```
tsl.getEvent(&event);
```

```
lux = event.light;
```

```
int16_t soilAdc = adsSoil.readADC_SingleEnded(SOIL_CH);
```

```
soilV = adsSoil.computeVolts(soilAdc);
```

```
soilPct = soilPercentFromVoltage(soilV);
```

```
// Carga a 1Hz, puedes usar 6 muestras
```

```
batPct = readBatteryPercent(6);
```

```
batPctInt = isnan(batPct) ? -1 : (int)round(batPct);
```

```
// Paquete compatible con TU RX: x10 para T/H/S
```

```
if (!manualPending) {
```

```
    int T10 = isnan(airTempC) ? -999 : (int)roundf(airTempC * 10.0f);
```

```
    int H10 = isnan(airHum) ? -999 : (int)roundf(airHum * 10.0f);
```

```
    int L = isnan(lux) ? -1 : (int)roundf(lux);
```

```
    int S10 = isnan(soilPct) ? -999 : (int)roundf(soilPct * 10.0f);
```

```
    snprintf(txpacket, BUFFER_SIZE, "T%d H%d L%d S%d", T10, H10, L, S10);
```

```
    sendPending = true;
```

```
}
```

```
// Refresco de pantalla cada 1s
```

```
drawValues();
```

}

```
// 3) Serial cada 1s (debug)
```

```
if (now - lastSerialMs >= SERIAL_PERIOD_MS) {
```

```
    lastSerialMs = now;
```

```
        Serial.print("T=");    if    (isnan(airTempC))    Serial.print("NaN");    else  
Serial.print(airTempC, 1);
```

```
        Serial.print("  H=");    if    (isnan(airHum))    Serial.print("NaN");    else  
Serial.print(airHum, 1);
```

```
        Serial.print(" L="); if (isnan(lux))    Serial.print("NaN"); else Serial.print(lux, 0);
```

```
        Serial.print("  S=");    if    (isnan(soilPct))    Serial.print("NaN");    else  
Serial.print(soilPct, 1);
```

```
        Serial.print("  BAT=");    if    (batPctInt < 0)    Serial.print("NaN");    else  
Serial.print(batPctInt);
```

```
        Serial.print("% | Packet: ");
```

```
        Serial.println(txpacket);
```

```
}
```

```
// 4) Prioridad: manual
```

```
if (manualPending && !txBusy) {
```

```
    manualPending = false;
```

```
    strncpy(txpacket, manualPacket, BUFFER_SIZE);
```

```
    txpacket[BUFFER_SIZE - 1] = '\0';
```

```
    sendPending = true;
```

```
}
```

// 5) Enviar LoRa si toca (y si no está ocupado)

```
if (sendPending && !txBusy) {  
  
    sendPending = false;  
  
    txBusy = true;  
  
    state = STATE_TX;  
  
}  
  
switch (state) {  
  
    case STATE_TX:  
  
        Radio.Send((uint8_t*)txpacket, strlen(txpacket));  
  
        state = LOWPOWER;  
  
        break;  
  
    case LOWPOWER:  
  
        Radio.IrqProcess();  
  
        break;  
  
    default:  
  
        break;  
  
}  
  
}
```

Anexo 2

Código de módulo Heltec T114 Receptor

El anexo 2 muestra el código correspondiente al nodo receptor de la red IoT. Este módulo se encarga de recibir los paquetes del nodo transmisor a través de la comunicación LoRa, decodifica la información y la muestra en su pantalla integrada. Adicionalmente, este microcontrolador reenvía la información por el puerto serial a la Raspberry Pi, permitiendo su publicación en AWS IoT Core.

```
#include <Arduino.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
#include <Adafruit_TinyUSB.h>
```

```
#include "heltec_nrf_lorawan.h"
```

```
#include <Adafruit_GFX.h>
```

```
#include <Adafruit_ST7789.h>
```

```
// ===== DISPLAY =====
```

```
Adafruit_ST7789 tft(&SPI1, PIN_TFT_CS, PIN_TFT_DC, PIN_TFT_RST);
```

```
static void tftPowerOn() {
```

```
    pinMode(PIN_TFT_VDD_CTL, OUTPUT);    digitalWrite(PIN_TFT_VDD_CTL,  
0);
```

```
    pinMode(PIN_TFT_LEDA_CTL, OUTPUT); digitalWrite(PIN_TFT_LEDA_CTL,  
0);
```

```
tft.init(135, 240);
```

```
tft.setRotation(3);
```

```
tft.setSPISpeed(40000000);
```

```
tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
```

```
tft.setTextWrap(false);
```

```
tft.setTextSize(2);
```

```
tft.setCursor(5, 5);
```

```
tft.setTextColor(ST77XX_ORANGE);

tft.print("T114 Receptor");

tft.setTextSize(1);

tft.setCursor(175, 10);

tft.setTextColor(ST77XX_GREEN);

tft.print("LoRa RX");

tft.drawFastHLine(0, 30, tft.width(), ST77XX_ORANGE);
}

static void clearDataArea() { tft.fillRect(0, 35, tft.width(), 100, ST77XX_BLACK); }

static void drawRxValues(float tC, float hPct, float luxVal, float soil, int16_t rssi,
int8_t snr) {

clearDataArea();

tft.setTextSize(1);

tft.setCursor(5, 35); tft.setTextColor(ST77XX_CYAN); tft.print("TEMP:");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); if (isnan(tC)) tft.print("--"); else { tft.print(tC,
1); tft.print("C"); }

tft.setCursor(5, 50); tft.setTextColor(ST77XX_CYAN); tft.print("HUM .:");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); if (isnan(hPct)) tft.print("--"); else {
tft.print(hPct, 1); tft.print("%"); }
```

```
tft.setCursor(5, 65); tft.setTextColor(ST77XX_YELLOW); tft.print("LUX :");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); if (isnan(luxVal)) tft.print("--"); else {
tft.print(luxVal, 0); tft.print("lx"); }

tft.setCursor(5, 80); tft.setTextColor(ST77XX_GREEN); tft.print("SOIL:");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); if (isnan(soil)) tft.print("--"); else {
tft.print(soil, 1); tft.print("%"); }

tft.setCursor(5, 118);

tft.setTextColor(ST77XX_BLUE); tft.print("RSSI ");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); tft.print(rssi); tft.print(" dBm ");

tft.setTextColor(ST77XX_BLUE); tft.print("SNR ");

tft.setTextColor(ST77XX_WHITE); tft.print(snr); tft.print(" dB");
}

// ===== LORA P2P RX =====

#define RF_FREQUENCY      915000000
#define LORA_BANDWIDTH    0
#define LORA_SPREADING_FACTOR 7
#define LORA_CODINGRATE   1
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
```

```
#define RX_BUFFER_SIZE 64
```

```
static RadioEvents_t RadioEvents;
```

```
volatile bool rxFlag = false;
```

```
uint8_t rxBuffer[RX_BUFFER_SIZE];
```

```
int16_t rxRssi = 0;
```

```
int8_t rxSnr = 0;
```

```
float tC = NAN, hPct = NAN, luxVal = NAN, soil = NAN;
```

```
bool lastWasTelemetry = false;
```

```
char lastRaw[RX_BUFFER_SIZE] = {0};
```

```
bool havePacket = false;
```

```
// ===== Timers =====
```

```
unsigned long lastUiMs = 0;
```

```
unsigned long lastSerMs = 0;
```

```
// Transmision cada 1s
```

```
const unsigned long UI_PERIOD_MS = 1000;
```

```
const unsigned long SERIAL_PERIOD_MS = 1000;
```

```
// ===== TX esperado (x10 en T/H/S)
```

```
=====
```

```
static bool parseTelemetry(const char* s) {

    int T10=0, H10=0, L=0, S10=0;

    if (sscanf(s, "T%d H%d L%d S%d", &T10, &H10, &L, &S10) == 4) {

        tC    = (T10 == -999) ? NAN : (T10 / 10.0f);
        hPct  = (H10 == -999) ? NAN : (H10 / 10.0f);
        luxVal = (L < 0)   ? NAN : (float)L;
        soil  = (S10 == -999) ? NAN : (S10 / 10.0f);

        return true;

    }

    return false;

}

static void printJsonLine(const char* raw, bool isTelemetry, bool haveData) {

    Serial.print("{\"src\":\"t114_tx\",\"type\":\"\"");

    if (!haveData) Serial.print("no_data");

    else Serial.print(isTelemetry ? "telemetry" : "raw");

    Serial.print("\"");

    if (haveData && isTelemetry) {

        Serial.print(",\"t_c\":"); if (isnan(tC)) Serial.print("null"); else Serial.print(tC, 1);

        Serial.print(",\"h\":"); if (isnan(hPct)) Serial.print("null"); else Serial.print(hPct, 1);

        Serial.print(",\"lux\":"); if (isnan(luxVal)) Serial.print("null"); else Serial.print(luxVal, 0);

        Serial.print(",\"soil\":"); if (isnan(soil)) Serial.print("null"); else Serial.print(soil,
```

```
1);
```

```
}
```

```
Serial.print(",\"rssi\":"); Serial.print(rxRssi);
```

```
Serial.print(",\"snr\":"); Serial.print(rxSnr);
```

```
Serial.print(",\"ts_ms\":"); Serial.print(millis());
```

```
Serial.print(",\"raw\":\");
```

```
if (haveData) {
```

```
    for (const char* p = raw; *p; p++) {
```

```
        if (*p == '\\') Serial.print("\\\\");
```

```
        else if (*p == '\\') Serial.print("\\\\");
```

```
        else if (*p == '\n' || *p == '\r') {}
```

```
        else Serial.print(*p);
```

```
    }
```

```
}
```

```
Serial.println("\");
```

```
}
```

```
// ===== Radio Callbacks =====
```

```
void OnRxDone(uint8_t* payload, uint16_t size, int16_t rssi, int8_t snr) {
```

```
    if (size >= RX_BUFFER_SIZE) size = RX_BUFFER_SIZE - 1;
```

```
    memcpy(rxBuffer, payload, size);
```

```
    rxBuffer[size] = 0;
```

```
rxRssi = rssi;

rxSnr = snr;

rxFlag = true;
}

void OnRxTimeout(void) { Radio.Rx(0); }
void OnRxError(void) { Radio.Rx(0); }

// ===== Setup =====

void setup() {

  boardInit(LORA_DEBUG_ENABLE, LORA_DEBUG_SERIAL_NUM, 115200);
  Serial.begin(115200);

  tftPowerOn();

  RadioEvents.RxDone = OnRxDone;
  RadioEvents.RxTimeout = OnRxTimeout;
  RadioEvents.RxError = OnRxError;

  Radio.Init(&RadioEvents);
  Radio.SetChannel(RF_FREQUENCY);

  Radio.SetRxConfig(MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH,
  LORA_SPREADING_FACTOR,
```

```
LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH,  
  
LORA_SYMBOL_TIMEOUT,  
LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,  
  
0, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, true);
```

```
// RX continuo"
```

```
Radio.Rx(0);
```

```
unsigned long now = millis();
```

```
lastUiMs = now;
```

```
lastSerMs = now;
```

```
}
```

```
// ===== Loop =====
```

```
void loop() {
```

```
Radio.IrqProcess();
```

```
unsigned long now = millis();
```

```
// 1) Si llega paquete, lo guardo y parseo
```

```
if (rxFlag) {
```

```
rxFlag = false;
```

```
strncpy(lastRaw, (char*)rxBuffer, RX_BUFFER_SIZE);
```

```
lastRaw[RX_BUFFER_SIZE - 1] = '\0';
```

```
lastWasTelemetry = parseTelemetry(lastRaw);

havePacket = true;

}

// 2) Pantalla cada 1s

if (now - lastUiMs >= UI_PERIOD_MS) {

    lastUiMs = now;

    drawRxValues(tC, hPct, luxVal, soil, rxRssi, rxSnr);

}

// 3) Serial cada 1s

if (now - lastSerMs >= SERIAL_PERIOD_MS) {

    lastSerMs = now;

    if (!havePacket) printJsonLine("", false, false);

    else printJsonLine(lastRaw, lastWasTelemetry, true);

}

}
```