

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**



TESIS

**Prototipo de estación de parámetros ambientales para
monitorear un cultivo de maracuyá en el caserío
Hualtaca de Olmos**

**Para obtener el título profesional de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Elaborado por:

Bach. Bazan Montenegro Dwilio Werner
Bach. Mayanga Pupuche Pablo

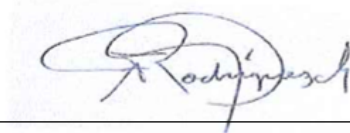
ASESOR:

Mg. Ing. Nombera Lossio Martín Augusto

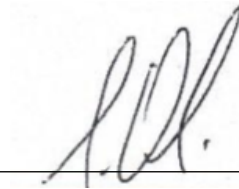
ORCID: 0000-0003-2459-8951

**LAMBAYEQUE – PERÚ
2025**

JURADOS



M.Sc. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos
Presidente



Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Secretario



Mg. Ing. Oscar Ucchelly Romero Cortez
Vocal

ASESOR



Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCION DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 34-202.6-D/FACFyM

Siendo las 12:00 m del día 14 de abril del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

Prototipo de estación de parámetros ambientales para monitorear un cultivo de maracujá en el caserío Hualtaca de Olmos"

Designados por Resolución N° 417-2024 - D/FACFyM de fecha 10 de abril de 2024

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Dr. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos

Presidente

Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera

Secretario

Dr. Ing. Oscar Vechelly Romero Cortez

Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Mg. Ing. Martín Augusto Nombere Lasso nombrado por Resolución N° 417-2024 - D/FACFyM de fecha 10 de abril de 2024

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 296-2026 D/FACFyM de fecha 08 de abril de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Bazán Montenegro, Duilio Werner y Mayanga Pupuche, Pablo y tuvo una duración de 35 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención BUENO.

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 01:20 PM se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

DR. ING. FRANK RICHARD RODRIGUEZ CHIRINOS
Presidente

Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
Secretario

DR. Ing. Oscar Vechelly Romero Cortez
Vocal

Mg. Ing. Martín Augusto Nombere Lasso
Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL ASESOR

Yo, Nombera Lossio Martin Augusto , usuario revisor del documento titulado **Prototipo De Estación De Parámetros Ambientales Para Monitorear Un Cultivo De Maracuyá En El Caserío Hualtaca De Olmos**

Cuyo autor es (son): Bazan Montenegro Dwilio Werner y Mayanga Pupuche Pablo

Identificado con Documento de Identidad 48268993 y 75853422; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de 18 %, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 01 de Abril de 2026



ASESOR

Mg. Ing. NOMBERRA LOSSIO MARTIN AUGUSTO

DNI: 16688697

PROTOTIPO DE ESTACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES PARA MONITOREAR UN CULTIVO DE MARACUYÁ EN EL CASERÍO HUALTACAL DE OLMOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	18%	3%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJO DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unprg.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
2	revistas.utp.ac.pa	1%
	Fuente de Internet	
3	dspace.ups.edu.ec	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.upt.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
6	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
7	1library.co	1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.unjbg.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	fastercapital.com	<1%
	Fuente de Internet	
10	www.crystalmedia.com	<1%
	Fuente de Internet	
11	docs.google.com	<1%
	Fuente de Internet	

Mg. Ing. Martin Augusto Nombèra Lossio

DNI: 16688697

ASESOR



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Dwilio Werner / Pablo Bazan Montenegro / Mayanga Pupuche
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: PROTOTIPO DE ESTACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES PA...
Nombre del archivo: Proyecto_-_Baz_n_Montenegro_y_Mayanga_Pupuche.docx
Tamaño del archivo: 13.08M
Total páginas: 63
Total de palabras: 11,782
Total de caracteres: 66,333
Fecha de entrega: 17-feb-2026 10:28p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2882034390

Mg. Ing. Martin Augsuto Nombera Lossio

DNI: 16688697
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



TESIS
"PROTOTIPO DE ESTACIÓN DE PARÁMETROS
AMBIENTALES PARA MONITOREAR UN CULTIVO DE
MARACUYÁ EN EL CASERÍO HUALTACAL DE OLMOS"

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

ELABORADA POR:

Bach. Bazan Montenegro Dwilio Werner
Bach. Mayanga Pupuche Pablo

ASESOR:

Mg. Ing. Nombera Lossio Martín Augusto

ORCID:

LAMBAYEQUE – PERÚ
2025

DEDICATORIA

"Dedico esta tesis a mis padres, seres a quienes adoro desde lo más profundo de mi corazón por ser artífices en la culminación de mis estudios superiores. Sus consejos y ayuda me dieron el impulso para salir adelante, tanto en los momentos felices como en los difíciles. A mis tíos y hermanos, por sus muestras de apoyo incondicional en esta etapa importante en mi vida".

AGRADECIMIENTOS

"A mi familia, mi refugio más seguro en este mundo lleno de desafíos. Agradezco sinceramente su apoyo moral, paciencia y su inquebrantable ánimo durante todo este proceso. Sus palabras de aliento y su presencia constante fueron la luz que guio mi camino a través de este viaje académico. Gracias por estar siempre presentes y por ser mi mayor inspiración para ser mejor cada día. Este logro es tan suyo como mío".

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
INFORMACIÓN GENERAL.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
I. DISEÑO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Internacionales	1
1.1.2. Nacionales.....	1
1.2. Bases teóricas	2
1.2.1. Internet de las Cosas.....	2
1.2.2. Agricultura inteligente con IoT	5
1.3. Operacionalización de variables.....	6
II. DISEÑO METODOLÓGICO.....	7
2.1. Tipo y enfoque de investigación	7
2.2. Población y muestra	7
2.3. Técnicas, instrumentos y equipos.....	7
2.4. Diseño de contrastación de hipótesis	15
III. RESULTADOS.....	17
3.1. Implementación de los nodos remotos de humedad y temperatura	17

3.2. Implementación del nodo central para el monitoreo y visualización de datos de humedad y temperatura.....	20
3.3. Evaluación de la estación de monitoreo remoto de humedad y temperatura	25
3.3.1. Precisión de medición	25
3.3.2. Estabilidad de transmisión	25
3.3.3. Consumo energético y autonomía	26
IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	27
V. CONCLUSIONES	30
VI. RECOMENDACIONES	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estado del cultivo de maracuyá.....	15
Figura 2. Componentes de los nodos sensores (I)	17
Figura 3. Componentes de los nodos sensores (II)	18
Figura 4. Esquema de conexión de los componentes de los nodos sensores.....	18
Figura 5. Montaje de los nodos sensores en el cultivo de maracuyá.....	19
Figura 6. Componentes del nodo central	21
Figura 7. Esquema de conexión de los componentes del nodo central.....	22
Figura 8. Montaje del nodo central en el cultivo de maracuyá.....	22
Figura 9. Reporte y monitoreo de datos en Telegram (I).....	23
Figura 10. Reporte y monitoreo de datos en Telegram (II)	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fases fenológicas del maracuyá.....	xv
Tabla 2. Definición y operacionalización de variables	6
Tabla 3. Principales especificaciones técnicas del ESP32	8
Tabla 4. Principales especificaciones técnicas del sensor capacitivo	8
Tabla 5. Principales especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad	9
Tabla 6. Principales especificaciones técnicas del panel solar	10
Tabla 7. Principales especificaciones técnicas del convertidor de voltaje (Step Down)	10
Tabla 8. Principales especificaciones técnicas del cargador de baterías de litio	11
Tabla 9. Principales especificaciones técnicas la betería de litio.....	12
Tabla 10. Principales especificaciones técnicas del convertidor de voltaje (Step Up)	12
Tabla 11. Principales especificaciones técnicas del módulo relay.....	13
Tabla 12. Lista de precio de componentes	13
Tabla 13. Estado actual del sistema de bombeo de agua	14
Tabla 14. Resultados de precisión del sistema de medición	25
Tabla 15. Desempeño de comunicación ESP-NOW (enero–octubre 2025)	25
Tabla 16. Autonomía y eficiencia energética del sistema.....	26

INFORMACIÓN GENERAL

Título

PROTOTIPO DE ESTACIÓN DE PARÁMETROS AMBIENTALES PARA MONITOREAR UN CULTIVO DE MARACUYÁ EN EL CASERÍO HUALTACAL DE OLMOS.

Autores

- Bach. Bazan Montenegro Dwilio Werner.
- Bach. Mayanga Pupuche Pablo.

Asesor de especialidad

- Mg. Ing. Nombera Lossio Martín Augusto.

Línea de investigación

- Ingenierías y Tecnologías.

Lugar

- Área de cultivo de maracuyá en el Caserío Hualtacal, Olmos, Lambayeque.

Duración:

- Fecha de inicio: 06 de enero 2025
- Fecha de término: 09 de Octubre 2025

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo implementar un prototipo de estación de parámetros ambientales basado en IoT para el monitoreo de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la humedad del suelo en un cultivo de maracuyá ubicado en el caserío Hualtacal, distrito de Olmos, región Lambayeque. El sistema estuvo conformado por cuatro nodos sensores y un nodo central, empleando microcontroladores ESP32 y ESP8266, interconectados mediante el protocolo ESP-NOW, lo que permitió una transmisión de datos estable y continua sin requerir conexión a internet entre los nodos. Cada nodo sensor fue alimentado por un sistema autónomo de energía solar compuesto por un panel fotovoltaico de 5 W, convertidores DC–DC, un cargador TP4056 y una batería de ion de litio, garantizando un funcionamiento sostenido en condiciones reales de campo. Las mediciones se realizaron con un intervalo de muestreo de 10 minutos durante el periodo comprendido entre enero y octubre de 2025, lo que permitió evaluar el desempeño del sistema ante variaciones ambientales propias de la zona de estudio. El nodo central se encargó de la recepción, procesamiento y visualización de los datos, así como de la activación automática del sistema de riego cuando la humedad del suelo descendió por debajo del umbral establecido del 40 %. La visualización remota de la información mediante la aplicación Telegram se realizó únicamente cuando el nodo central dispuso de conectividad a internet, funcionando como una capa adicional de supervisión, sin afectar la operación local y autónoma del sistema de monitoreo. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del prototipo y demuestran que la implementación del sistema IoT mejoró el proceso de monitoreo ambiental respecto al método manual previo, al permitir la adquisición continua de datos, su transmisión inalámbrica, la visualización remota y la respuesta automática del sistema.

Palabras clave: IoT, ESP32, humedad del suelo, activación automática de riego, Telegram.

ABSTRACT

The present research aimed to implement an IoT-based environmental parameter station prototype for monitoring ambient temperature, relative humidity, and soil moisture in a passion fruit crop located in the Hualtaca hamlet, Olmos district, Lambayeque region. The system consisted of four sensor nodes and one central node, using ESP32 and ESP8266 microcontrollers interconnected through the ESP-NOW protocol, which enabled stable and continuous data transmission without requiring Internet connectivity between nodes. Each sensor node was powered by an autonomous solar energy system composed of a 5 W photovoltaic panel, DC–DC converters, a TP4056 charging module, and a lithium-ion battery, ensuring sustained operation under real field conditions. Measurements were performed at a 10-minute sampling interval during the period from January to October 2025, allowing the evaluation of system performance under environmental variations characteristic of the study area. The central node was responsible for data reception, processing, and visualization, as well as for the automatic activation of the irrigation system when soil moisture dropped below the established threshold of 40 %. Remote data visualization through the Telegram application was available only when the central node had Internet connectivity, functioning as an additional supervision layer without affecting the local and autonomous operation of the monitoring system. The results confirm the technical feasibility of the prototype and demonstrate that the implementation of the IoT system improved the environmental monitoring process compared to the previous manual method, by enabling continuous data acquisition, wireless transmission, remote visualization, and automatic system response.

Keywords: IoT, ESP32, soil moisture, automatic activation of the irrigation system, Telegram.

INTRODUCCIÓN

La “Ficha Técnica Agroclimática del Maracuyá”, elaborada por el Ministerio del Ambiente del Perú (2019), señala que el maracuyá es un fruto de la región amazónica, de gran adaptabilidad y considerada una excelente fuente de vitaminas A y C. El estudio revela que el maracuyá se cultiva principalmente en las zonas costeras y, en cierta medida, también en las zonas de la sierra, pero la principal zona de cultivo se encuentra en la zona costera del norte, desde Piura hasta Lima.

Respecto a los requerimientos de cultivo, Amaya Robles (2009), en su estudio "Cultivo de Maracuyá" realizado para la Gerencia Regional Agraria de La Libertad, afirma que el maracuyá es sensible al frío y requiere un clima tropical para su óptimo crecimiento. El estudio señala que es importante garantizar que las temperaturas del suelo no superen los 24°C a 28°C. También indica que superar el rango de temperatura recomendado promueve el crecimiento, pero limita la formación de flores, provoca un olor desagradable en los frutos, reduce el peso y retrasa la aparición del color amarillo, mientras que un rango de temperatura inferior al recomendado limita el número de frutos. En cuanto a la humedad relativa, el estudio afirma que una mayor humedad aumenta el peso y el contenido de jugo en la fruta.

De acuerdo con el “Manual de Observaciones Fenológicas”, desarrollado por Yzarra Tito y López Ríos (2017) para el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, la fenología de cultivo del maracuyá tiene cuatro etapas o fases: foliación, floración, fructificación y maduración. En la fase de foliación, las hojas comienzan a caer o a rebrotar. En la fase de floración se abren las primeras flores, con una corola formada por cinco pétalos y filamentos de color púrpura en la base y blanco en la parte superior. Durante la fructificación aparecen frutos que miden de 6 a 7 cm de diámetro y de 6 a 12 cm de largo. Finalmente, cuando el fruto madura, alcanza el máximo tamaño y color característico.

En la Tabla 1 se indican los valores mínimos y máximos para la temperatura del suelo, así como para la humedad relativa en cada una de las fases fenológicas del maracuyá.

Tabla 1. *Fases fenológicas del maracuyá*

Fase fenológica	Descripción de la etapa	Meses aproximados	Temperatura máxima promedio (°C)	Temperatura mínima promedio (°C)	Temperatura promedio (°C)	Humedad relativa (%)
Foliación	Brote de hojas, desarrollo de ramas y establecimiento del follaje.	Enero a Marzo (ideal para el desarrollo vegetativo).	30	20	26	60 – 70
Floración	Aparición y apertura de las flores.	Abril a Mayo, y en algunos casos se repite hacia Septiembre.	30	20	26	61 – 70
Fructificación	Formación del fruto, incremento de tamaño y acumulación de jugo.	Mayo a Julio, extendiéndose hasta Agosto según la zona.	30	20	26	62 – 70
Maduración	Alcanza su color característico y máximo contenido de azúcares.	Julio a Septiembre, aunque con riego puede prolongarse hasta Octubre–Noviembre.	30	20	26	63 – 70

Fuente: Miranda et al., (2019).

Por otro lado, Guerrero Ibáñez et al. (2017) sostienen que, en los últimos años, los investigadores han promovido activamente el uso de la tecnología en el sector agrícola. Mientras que Mosquera Meléndrez y Cevallos Rojas (2022) consideran que el Internet de las Cosas (IoT) y su integración con otras tecnologías permite transmitir información recogida mediante una red de sensores de campo hacia una plataforma en Internet, donde los sistemas de información procesan los datos y proporcionan a los agricultores información sobre situaciones inusuales para mejorar la toma de decisiones que ayudan a mejorar la producción. Por su parte, Arteaga Quico y Wong Portillo (2021) señalan que mediante el uso de IoT, los agricultores pueden recibir alertas en dispositivos electrónicos como smartphones, tabletas y ordenadores para realizar determinadas acciones.

Lo anterior sugiere que el uso de IoT en la agricultura es útil principalmente para el cuidado de los cultivos, proporcionando información sobre diversas condiciones mediante el monitoreo de parámetros ambientales como temperatura, humedad relativa, pH, salinidad, entre otros. Sin embargo, la gran inversión inicial necesaria para adquirir e instalar el equipo dificulta que los pequeños agricultores puedan aprovechar esta tecnología. Tal es el caso del Sr. Enrique Mayanga Ramírez, quien cultiva y cosecha limones, maracuyá y mangos en el Caserío Hualtaca de Olmos, Lambayeque. En las zonas de cultivo de maracuyá, el riego se realiza por el método de inundación, ya que no existe un sistema de riego automático. Además, no existe un sistema de monitoreo de parámetros ambientales que permita mejorar la productividad en las diferentes etapas fenológicas del maracuyá. Si este problema persiste, la producción de maracuyá puede verse afectada por el desarrollo de olores desagradables, el retraso para alcanzar el color amarillo característico, la reducción de peso, la disminución de jugo y de la cantidad de frutos, generando grandes pérdidas económicas.

En el contexto peruano, el problema no es solo tecnológico; también es una cuestión práctica y cuantitativa, porque el uso poco eficiente del agua de riego termina afectando directamente los costos y la productividad del campo. En todo el país, alrededor del 80 % del agua disponible se destina a la agricultura, pero cerca del 65 % se pierde debido a que todavía se utilizan sistemas tradicionales de baja eficiencia. Esto no solo encarece la producción, sino que además pone en riesgo la sostenibilidad del recurso a largo plazo (Gestión de recursos hídricos en el Perú, s. f.).

Por otro lado, la eficiencia promedio del riego apenas alcanza el 35 %, y son muy pocas las hectáreas agrícolas que cuentan con riego tecnificado (Riego en el Perú, s. f.). En este panorama, la falta de monitoreo constante de variables como la humedad del suelo o la temperatura ambiente hace difícil saber con exactitud cuándo y cuánto regar, generando un

consumo innecesario de energía, pérdida de agua y, en muchos casos, una disminución del rendimiento del cultivo por estrés hídrico.

Por ello, contar con un sistema automatizado y autónomo de monitoreo ambiental deja de ser una opción lejana y se vuelve una necesidad real para mejorar el control del riego y evitar el desperdicio de recursos, sobre todo en cultivos como el maracuyá, que dependen tanto del equilibrio entre humedad y temperatura.

Para abordar este problema, se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera la implementación de un prototipo de estación de parámetros ambientales basado en IoT permite mejorar el monitoreo de temperatura y humedad en un cultivo de maracuyá durante sus fases fenológicas en el Caserío Hualtaca de Olmos?

La hipótesis fue la siguiente: La implementación de un prototipo de estación de parámetros ambientales basado en IoT mejora el proceso de monitoreo de temperatura y humedad en un cultivo de maracuyá, en comparación con el monitoreo manual previo, al permitir la adquisición continua de datos, su transmisión inalámbrica en tiempo real, la visualización remota y la respuesta automática ante condiciones fuera de los rangos establecidos durante sus fases fenológicas.

El objetivo general fue: Implementar un prototipo de estación de parámetros ambientales para monitorear el estado de un cultivo de maracuyá durante sus fases fenológicas en el Caserío Hualtaca de Olmos. Los objetivos específicos fueron: i) Implementar los nodos sensores para medir la temperatura ambiente, la humedad relativa y la humedad del suelo; ii) Implementar un nodo central para monitorear la temperatura ambiente, la humedad relativa y la humedad del suelo; y iii) Realizar pruebas experimentales para validar el funcionamiento general del sistema y evaluar su precisión, estabilidad y consumo energético durante el proceso de monitoreo.

Es importante precisar que la presente investigación se centra en la mejora del proceso de monitoreo ambiental mediante el uso de tecnología IoT, sin evaluar directamente indicadores agronómicos como rendimiento, productividad o ahorro hídrico. Dichos aspectos quedan planteados como líneas de investigación futura a partir de los resultados obtenidos.

I. DISEÑO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacionales

Rueda y Quintero (2022) desarrollaron un prototipo que utiliza un sistema embebido para almacenar información sobre la humedad del suelo y fotografías de los cultivos de Chile en tiempo real y visualizarlas en una aplicación web. Los resultados mostraron que el prototipo ayuda a realizar tareas como el recuento de plantas y la supervisión del riego de los cultivos en tiempo real en función de la humedad del suelo.

Monge y Paguay (2022) desarrollaron un dispositivo IoT basado en un módulo ESP32, sensores e interfaz gráfica para adquirir y visualizar datos como la temperatura ambiente y la humedad del suelo en un campo de maíz. Los resultados mostraron que el prototipo ayuda a monitorizar los parámetros de forma remota y envía mensajes de alerta a través de Telegram indicando que un parámetro está fuera de rango.

Chara y Looor (2022) desarrollaron un prototipo de hardware y software con el objetivo de monitorear los parámetros de calidad del agua en los estanques de camarones y ofrecer una alternativa a la industria camaronera. Los resultados mostraron que la tecnología IoT automatiza el proceso de medición y almacenamiento de datos, mejorando el proceso de control de los parámetros de calidad del agua en comparación con el trabajo manual.

1.1.2. Nacionales

Berrios y Rivera (2022) desarrollaron un sistema IoT basado en el módulo ESP32 para monitorear y controlar parámetros en un cultivo de lechugas. Los resultados mostraron que los nodos sensores envían datos a un nodo central para activar y desactivar los actuadores, y esta información se registra en una base de datos para su control.

Peñaloza y Yupanqui (2022) desarrollaron una red de sensores inalámbricos LPWAN basado en la placa TTGO LORA 32 para monitorear la temperatura, la humedad y el pH en cultivos de fresas. El prototipo desarrollado demostró ser útil para supervisar remotamente los parámetros de crecimiento de las plantas de fresa mediante cualquier dispositivo conectado a Internet.

Altamirano y Merino (2022) desarrollaron un sistema IoT basado en un módulo WiFi con capacidad de adquisición de señales de temperatura, humedad ambiental, luz, pH y nivel de agua en un criadero de peces. Los resultados mostraron que el prototipo proporciona información sobre las variables ambientales y bioquímicas para activar o desactivar los actuadores pertinentes y mantener las condiciones óptimas de cultivo.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Internet de las Cosas

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) puede conceptualizarse como una compleja red de dispositivos físicos interconectados, que se comunican e intercambian información tanto entre sí como con la Internet. Este paradigma refleja una evolución significativa del Internet tradicional, en la que el acceso ya no se limita únicamente a las personas, sino que se extiende a una amplia gama de objetos físicos, transformando radicalmente nuestras formas de comunicación y la interacción con el entorno (Fernández, 2021).

El término "Internet de las Cosas" fue acuñado por primera vez por Kevin Ashton en 1999, en el contexto de la optimización de la cadena de suministro de la empresa Procter & Gamble. Ashton propuso la colocación de etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) en los productos, lo que permitió su identificación y seguimiento desde la producción hasta el punto de venta. Este avance tecnológico supuso un cambio de paradigma en la gestión

logística, facilitando una mayor eficiencia y precisión en la cadena de suministro (Cuadrado, 2021).

El crecimiento exponencial del IoT se ha visto impulsado por la reducción en los costos y la miniaturización de los componentes electrónicos. Este progreso tecnológico ha permitido que una gran variedad de dispositivos cotidianos, desde electrodomésticos hasta sistemas de transporte, puedan estar equipados con sensores y módulos de comunicación que les permiten transmitir datos a través de Internet. La capacidad de estos dispositivos para recopilar, procesar y compartir información ha abierto un abanico de posibilidades en diversos campos, desde la domótica hasta la salud y la industria (Flores y Cossio, 2021).

Esta interconexión de dispositivos a través del IoT no solo optimiza procesos y mejora la eficiencia, sino que también plantea nuevos desafíos y oportunidades en términos de seguridad, privacidad y gestión de datos. La implementación efectiva de soluciones basadas en IoT requiere una consideración cuidadosa de estos factores, así como el desarrollo de nuevas normativas y estándares para garantizar un entorno seguro y confiable para la transmisión de datos (Fernández, 2021).

En el sector industrial, conocido como IIoT (Internet Industrial de las Cosas), IoT ha permitido el desarrollo de fábricas inteligentes, donde sensores y dispositivos conectados monitorizan en tiempo real el funcionamiento de maquinaria, permitiendo el mantenimiento predictivo y la automatización de procesos. Esto reduce tiempos de inactividad, mejora la productividad y minimiza los costos operativos. Las plantas de manufactura ahora pueden anticipar fallas antes de que ocurran, gracias a los datos recolectados por sensores que miden la vibración, temperatura y otras variables críticas de equipos (Flores y Cossio, 2021).

El sector de la salud también ha experimentado grandes avances con IoT, mediante el desarrollo de dispositivos médicos conectados que permiten el monitoreo remoto de pacientes. Esto facilita la atención personalizada, permitiendo a los profesionales de la salud supervisar

las condiciones de los pacientes en tiempo real, detectar problemas antes de que se agraven y reducir la necesidad de visitas físicas al hospital. Dispositivos como monitores de ritmo cardíaco y glucómetros conectados son ejemplos de cómo IoT está mejorando la calidad de vida y reduciendo costos en la atención médica (Altamirano y Merino, 2022).

En el sector agrícola, IoT ha dado lugar a la agricultura de precisión, donde sensores distribuidos por los campos recopilan datos sobre la humedad del suelo, la temperatura, la luz y el estado de los cultivos. Estos datos permiten a los agricultores tomar decisiones informadas sobre el riego, la fertilización y la protección de los cultivos, optimizando el uso de recursos y mejorando los rendimientos. Además, el monitoreo remoto de ganado a través de dispositivos IoT facilita el seguimiento de la salud animal y reduce la necesidad de intervenciones manuales (Peñaloza y Yupanqui, 2022).

Otro sector clave donde IoT ha tenido un impacto significativo es el transporte y la logística. Mediante el uso de sensores y tecnologías de seguimiento en tiempo real, las empresas pueden optimizar rutas de transporte, monitorizar el estado de los vehículos y mejorar la gestión de inventarios. Esto ha permitido reducir los tiempos de entrega, mejorar la eficiencia energética y garantizar la seguridad de las mercancías durante su traslado. La automatización en el transporte, como los vehículos autónomos y drones de entrega, también ha comenzado a ganar terreno gracias a la tecnología IoT (Berrios y Rivera, 2022).

Finalmente, en el ámbito de las ciudades inteligentes, IoT juega un rol crucial en la gestión de infraestructuras como el alumbrado público, los sistemas de tráfico y el suministro de agua. Los sensores conectados permiten una supervisión más eficiente de los servicios urbanos, ayudando a las ciudades a reducir costos, mejorar la sostenibilidad y crear entornos más seguros para sus habitantes. Las soluciones de IoT en este contexto incluyen la optimización del consumo de energía y la reducción de la contaminación, haciendo que las ciudades sean más habitables y ambientalmente responsables (Monge y Paguay, 2022).

Podemos concluir que el Internet de las Cosas representa una transformación profunda en nuestra interacción con la tecnología y el entorno, ofreciendo nuevas oportunidades para la innovación y la mejora de la calidad de vida, al tiempo que plantea importantes retos que deben ser abordados para aprovechar plenamente su potencial.

1.2.2. Agricultura inteligente con IoT

El sector agrícola no ha quedado indiferente ante la modernización de los procesos mediante el uso de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT). Este fenómeno se debe, principalmente, a la imperiosa necesidad de incrementar la eficiencia en la productividad agrícola a través de una utilización óptima de los recursos, al mismo tiempo que se mitiga el impacto ambiental asociado a las actividades agropecuarias (Loza, 2021).

Una de las técnicas más destacadas en este ámbito es la agricultura de precisión. Esta técnica se enfoca en la optimización y mejoramiento de los procesos agropecuarios mediante la monitorización en tiempo real de las condiciones ambientales y del suelo. Los sensores desplegados en los campos agrícolas recopilan y transmiten datos constantemente. Estos datos, una vez analizados, constituyen la base para la toma de decisiones estratégicas sobre las acciones a ejecutar por los actuadores del sistema. Además, la recopilación continua de información permite la creación de un historial detallado que facilita la trazabilidad de los productos y la gestión eficiente de las cadenas de suministro (Ojo y Bonilla, 2020).

La implementación de la agricultura de precisión a través del IoT no solo mejora la eficiencia y la productividad, sino que también contribuye a una gestión más sostenible de los recursos naturales. Por ejemplo, el monitoreo constante del suelo y las condiciones climáticas permite el uso preciso de fertilizantes y agua, reduciendo así el desperdicio y el impacto ambiental. Asimismo, la capacidad de rastrear y documentar el historial de los productos agrícolas asegura una mayor transparencia y calidad en la cadena de suministro, lo que puede

traducirse en beneficios económicos y reputacionales para los productores (Peñaloza y Yupanqui, 2022).

Podemos concluir que la integración del IoT en el sector agrícola representa una revolución en la forma en que se gestionan y optimizan los procesos agropecuarios. La agricultura de precisión, como una de sus principales aplicaciones, no solo incrementa la eficiencia y productividad, sino que también promueve una agricultura más sostenible y transparente, adaptándose a las necesidades del siglo XXI y contribuyendo a la seguridad alimentaria global.

1.3. Operacionalización de variables

Tabla 2. Definición y operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Instrumento
Estación de parámetros ambientales (Variable independiente)	Conjunto de dispositivos electrónicos y sensores conectados mediante tecnología IoT, diseñados para medir y transmitir parámetros ambientales con precisión y estabilidad en campo.	Se evaluará mediante pruebas experimentales del prototipo, verificando la precisión de los sensores (temperatura y humedad), la estabilidad de transmisión de datos entre los nodos y el nodo central, y la autonomía energética del sistema alimentado por energía solar.	- Sistema de adquisición de datos- Sistema de comunicación inalámbrica- Sistema de alimentación solar- Sistema de monitoreo remoto y control automático	Sensores DHT11 y capacitivo v1.2, microcontroladores ESP32 y ESP8266, módulo relay, panel solar, cargador TP4056, batería de litio, y aplicación Telegram.
Monitoreo del cultivo de maracuyá (Variable dependiente)	Se entiende como el proceso de supervisión técnica de las condiciones ambientales que influyen en el cultivo, mediante la medición, registro, transmisión y visualización de variables físicas como temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, sin evaluar directamente indicadores agronómicos de producción o rendimiento.	La variable se mide a través del desempeño del sistema IoT implementado, considerando la continuidad del monitoreo, la precisión de los sensores, la estabilidad de la transmisión de datos, la disponibilidad de información en tiempo real y la respuesta automática del sistema de riego ante condiciones de humedad del suelo por debajo del umbral establecido.	- Temperatura y humedad ambiente- Humedad del suelo- Activación automática de riego- Comunicación y visualización en tiempo real	Estación de parámetros ambientales implementada (prototipo IoT) y aplicación Telegram para visualización de datos y alertas.

II. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Tipo y enfoque de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, porque buscó dar solución a un problema real mediante el desarrollo de un prototipo tecnológico funcional. El enfoque fue cuantitativo, ya que se basó en la medición numérica de variables físicas como temperatura y humedad, obtenidas directamente del sistema IoT implementado. El nivel de investigación fue descriptivo con validación experimental, dado que se describieron las características del sistema propuesto y se realizaron pruebas controladas en campo para evaluar su desempeño y validar la hipótesis.

2.2. Población y muestra

La investigación se trata de un estudio de caso, ya que se centra específicamente en un cultivo de maracuyá ubicado en el Caserío Hualtaca de Olmos, Lambayeque. La elección de este caso responde a la necesidad de comprender cómo un cultivo de maracuyá en esta zona de Olmos puede ser monitoreado durante sus fases fenológicas, lo cual facilita la implementación de un sistema adaptado a las condiciones ambientales locales.

El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, ya que se seleccionó este cultivo debido a su accesibilidad y relevancia en el Caserío Hualtaca de Olmos, Lambayeque, lo que permitió obtener información valiosa sobre la viabilidad y efectividad de las tecnologías de monitoreo propuestas en un entorno real.

La investigación no busca una generalización amplia, sino generar conocimientos específicos sobre este caso particular, con la finalidad de realizar ajustes y mejoras con base en los resultados obtenidos.

2.3. Técnicas, instrumentos y equipos

En este estudio, se recopiló información sobre el uso de dispositivos IoT para la monitorización de parámetros ambientales como la temperatura y la humedad a partir de artículos académicos, tesis y libros seleccionados mediante el análisis de documentos.

De acuerdo con Loza (2021), el uso del ESP32 como controlador en el sistema de riego y monitoreo para los cultivos es una opción ideal debido a su bajo costo, lo que lo hace accesible para pequeños agricultores. Además, ofrece capacidades de IoT al integrar sensores que monitorean parámetros ambientales (temperatura, humedad, humedad del suelo, etc.), mejorando la gestión y la productividad del cultivo. Su eficiencia energética y facilidad de programación permiten su implementación en áreas rurales, y su capacidad de expansión permite automatizar el sistema en el futuro, optimizando el uso del agua y reduciendo pérdidas económicas.

Tabla 3. Principales especificaciones técnicas del ESP32

Especificación	Descripción	Foto
Microprocesador	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6	
Velocidad del reloj	Hasta 240 MHz	
Memoria RAM	520 KB SRAM	
Memoria Flash	Hasta 16 MB	
Conectividad Wi-Fi	802.11 b/g/n	
Conectividad Bluetooth	Bluetooth 4.2 + BLE	
Número de pines GPIO	34 pines GPIO	
Soporte de entradas analógicas	6 canales de entrada analógica (ADC de 12 bits)	
Soporte de salidas PWM	16 canales PWM	
Consumo de energía en modo activo	160-240 Ma	
Consumo de energía en modo deep sleep	10 µA	
Voltaje de operación	2.2 V - 3.6 V	
Interfaces de comunicación	UART, SPI, I2C, I2S, CAN	
Soporte de protocolos IoT	MQTT, HTTP, CoAP	

Según Ojo y Bonilla (2020), el uso de un sensor capacitivo de humedad del suelo es ideal para cultivos, ya que ofrece durabilidad al no corroerse, precisión en la medición al no ser afectado por minerales del suelo, y es compatible con sistemas de IoT como el ESP32. Su bajo costo y fácil implementación permiten monitorear la humedad del suelo, evitando el exceso o la falta de agua, lo que mejora la productividad del cultivo.

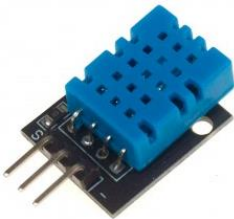
Tabla 4. Principales especificaciones técnicas del sensor capacitivo

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2	
Método de detección	Capacitancia	
Voltaje de operación	3.3V - 5.5V	
Rango de voltaje de salida	0V - 3V (analógico)	
Interfaz de salida	Salida analógica	
Rango de medición de humedad	0 - 100% humedad del suelo	
Material de la sonda	PCB (placa de circuito impreso)	

Tamaño	98mm x 23mm
Vida útil estimada	Duradera, resistente a la corrosión
Compatibilidad	Compatible ESP32, Arduino, etc.

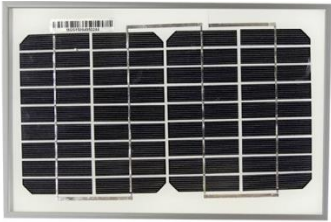
De acuerdo con Peñaloza y Yupanqui (2022), el uso del sensor DHT22 para medir la temperatura y la humedad ambiental en cultivos es ideal debido a su precisión y capacidad de monitoreo continuo en tiempo real. Este sensor permite obtener datos ambientales clave que influyen directamente en el desarrollo del cultivo, ya que la temperatura y la humedad relativa afectan el crecimiento, la floración y la calidad del fruto. Además, su bajo costo y facilidad de integración con controladores como el ESP32 lo hacen una excelente opción para sistemas agrícolas automatizados.

Tabla 5. Principales especificaciones técnicas del sensor de temperatura y humedad

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	DHT11	
Rango de medición de temperatura	0 °C a 50 °C	
Precisión de temperatura	±2 °C	
Rango de medición de humedad	20 % a 90 % de humedad relativa	
Precisión de humedad	±5 % de HR	
Voltaje de operación	3.3 V – 5.5 V	
Corriente de operación	0.3 mA / 2.5 mA	
Frecuencia de muestreo	1 Hz (una lectura por segundo)	
Interfaz de salida	Digital de un solo hilo	
Tiempo de respuesta	Menos de 6 segundos	

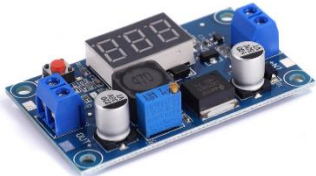
El panel solar monocristalino de 5 W es un módulo compacto y eficiente diseñado para convertir la energía solar en electricidad de corriente continua. Gracias a su estructura de celdas monocristalinas, ofrece una alta eficiencia energética incluso bajo condiciones de baja radiación solar, como días nublados o parcialmente cubiertos. Su voltaje de salida óptimo (17.8 V a 18 V) lo hace ideal para aplicaciones con controladores de carga o sistemas de bajo consumo, permitiendo la carga estable de baterías o el suministro de energía a dispositivos IoT y sistemas autónomos. Por su ligereza y facilidad de instalación, es una excelente opción para proyectos de energía solar portátiles o de campo.

Tabla 6. Principales especificaciones técnicas del panel solar

Especificación	Descripción	Foto
Tipo de panel	Monocristalino	
Potencia nominal (P _{max})	5 W	
Voltaje en circuito abierto (V _{oc})	21.92 V	
Corriente en cortocircuito (I _{sc})	0.28 A	
Voltaje a máxima potencia (V _{mp})	17.8 V – 18.0 V	
Corriente a máxima potencia (I _{mp})	0.27 A – 0.28 A	
Temperatura de trabajo	-45 °C a +85 °C	
Tolerancia de potencia	±3 %	
Material del panel	Celdas solares monocristalinas	
Grado de protección	IP65	
Dimensiones	19 cm × 29 cm × 1.7 cm	
Tipo de instalación	Diseñado para exteriores	

El convertidor de voltaje DC-DC Step-Down LM2596 es un módulo electrónico diseñado para reducir eficientemente un voltaje de entrada continuo (DC) a un nivel de salida inferior, manteniendo una alta estabilidad y eficiencia. Utiliza la topología buck converter y un regulador integrado LM2596, capaz de suministrar hasta 3 amperios de corriente con una eficiencia superior al 90 %, lo que lo convierte en una opción ideal para aplicaciones donde se requiere alimentar microcontroladores, sensores, módulos de comunicación y otros dispositivos electrónicos sensibles. Su voltaje de salida es ajustable mediante un potenciómetro, permitiendo obtener valores entre 1.23 V y 37 V, a partir de una entrada de 4.5 V a 40 V.

Tabla 7. Principales especificaciones técnicas del convertidor de voltaje (Step Down)

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	LM2596 Step-Down	
Tipo de conversor	Reductor de voltaje DC-DC	
Voltaje de entrada (V _{in})	4.5 V a 40 V DC	
Voltaje de salida (V _{out})	Ajustable entre 1.23 V y 37 V DC	
Corriente de salida máxima	3 A (recomendada ≤ 2 A)	
Frecuencia de conmutación	150 kHz	
Eficiencia	Hasta 92 %	
Caída de voltaje mínima	Aproximadamente 1.5 V–2 V	
Regulación de carga	±1 % típica	
Protección térmica	Integrada (shutdown por sobretemperatura)	
Protección por sobrecorriente	Sí (limitación interna de corriente)	
Tipo de ajuste de salida	Potenciometro multivuelta (ajuste fino)	
Temperatura de operación	-40 °C a +125 °C	

El módulo cargador de batería de litio TP4056 (modelo HW-168) es un circuito compacto y económico diseñado para recargar baterías de iones de litio o polímero de una sola celda (3.7 V) de forma segura y eficiente. Utiliza el chip TP4056, que regula automáticamente el proceso de carga en tres etapas: pre-carga, carga constante de corriente y carga constante de voltaje, garantizando así una mayor vida útil de la batería. El módulo se alimenta fácilmente mediante un conector micro-USB o por pines de entrada directos, entregando una corriente máxima de hasta 1 amperio. Además, incorpora protecciones integradas contra sobrecarga, sobredescarga, sobrecorriente y cortocircuitos, lo que lo hace ideal para aplicaciones electrónicas portátiles y sistemas embebidos. Los LED indicadores permiten visualizar el estado de carga, facilitando su uso en proyectos de energía autónoma, IoT, robótica y dispositivos recargables.

Tabla 8. Principales especificaciones técnicas del cargador de baterías de litio

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	HW-168	
Chip controlador	TP4056	
Tipo de carga	Cargador lineal	
Voltaje de entrada	4.5 V a 5.5 V DC	
Voltaje de salida (de carga)	4.2 V DC (fijo)	
Corriente de carga máxima	1 A (ajustable)	
Tipo de conector	Micro-USB tipo B	
Protección contra sobrecarga	Sí, integrada en el chip	
Protección contra sobrecorriente y cortocircuito	Sí	
Protección contra descarga excesiva	Sí	
Indicadores LED	Rojos: cargando Azul o verde: carga completa	
Temperatura de operación	-10 °C a +85 °C	
Dimensiones típicas	25 mm × 19 mm × 1.2 mm	

La batería de ion de litio HI 603048 es una celda recargable compacta y ligera, ideal para aplicaciones electrónicas portátiles que requieren buena densidad energética y larga vida útil. Posee una tensión nominal de 3.7 V y una capacidad de 800 mAh, adecuada para alimentar microcontroladores, sensores, módulos inalámbricos o sistemas solares de baja potencia. Su estructura interna de polímero de litio (Li-Po) ofrece mayor estabilidad térmica y permite ciclos de carga y descarga prolongados si se utiliza junto a un circuito de protección TP4056, que regula la carga hasta 4.2 V y evita sobrecargas o descargas profundas.

Tabla 9. Principales especificaciones técnicas la batería de litio

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	HI 603048	
Tipo de batería	Ion de litio recargable	
Voltaje nominal	3.7 V	
Capacidad nominal	800 mAh	
Energía almacenada	2.96 Wh	
Voltaje máximo de carga	4.2 V $\pm$ 0.05 V	
Voltaje mínimo de descarga	2.75 V	
Corriente de carga estándar	0.5 C ($\approx$ 400 mA)	
Corriente de carga máxima	1 C ($\approx$ 800 mA)	
Corriente de descarga continua	Hasta 1 C ($\approx$ 800 mA)	
Temperatura de carga	0 °C a +45 °C	
Temperatura de descarga	-20 °C a +60 °C	
Protección recomendada	Uso con módulo TP4056	
Dimensiones aproximadas	6.0 mm $\times$ 30 mm $\times$ 48 mm	

El convertidor DC-DC Step-Up MT3608 es un módulo elevador de voltaje compacto y eficiente, diseñado para incrementar la tensión de una fuente DC de bajo nivel hasta un valor superior ajustable. Utiliza el chip MT3608, que opera a una alta frecuencia de 1.2 MHz, permitiendo una conversión eficiente con componentes pequeños y mínima disipación térmica. Su voltaje de salida se ajusta mediante un potenciómetro multivuelta, lo que permite calibrar con precisión el nivel deseado según la aplicación. Con una corriente de salida de hasta 2 amperios (1.5 A recomendada para trabajo continuo), este módulo es ideal para proyectos con baterías de litio o fuentes de 5 V que requieren alimentar cargas a 9 V, 12 V, o 24 V, como sistemas IoT, circuitos de control, tiras LED, o pequeños dispositivos portátiles.

Tabla 10. Principales especificaciones técnicas del convertidor de voltaje (Step Up)

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	MT3608	
Tipo de conversor	Elevador de voltaje DC-DC	
Chip controlador	MT3608	
Voltaje de entrada (Vin)	2 V a 24 V DC	
Voltaje de salida (Vout)	5 V hasta 28 V DC	
Corriente de salida máxima	2 A (recomendado $\leq$ 1.5 A)	
Frecuencia de conmutación	1.2 MHz	
Eficiencia	Hasta 93 %	
Modo de regulación	Conmutación PWM	
Caída mínima de entrada	Requiere Vin < Vout	
Protección térmica	Integrada en el chip	
Protección contra sobrecorriente	No incorporada	
Ajuste de voltaje de salida	Potenciómetro multivuelta	
Temperatura de operación	-20 °C a +85 °C	
Dimensiones	36 mm $\times$ 17 mm $\times$ 14 mm	

El Módulo Relay 2CH 5VDC es un dispositivo de conmutación que permite controlar cargas eléctricas de alto voltaje o corriente utilizando señales de bajo voltaje provenientes de un microcontrolador o sistema lógico. Cada canal incluye un relé electromecánico SPDT (un polo, doble tiro) que puede manejar hasta 10 amperios en 250 V AC o 30 V DC. El módulo funciona con una alimentación de 5 VDC, posee optoacopladores para proteger los circuitos de control frente a picos eléctricos y un diodo flyback que suprime tensiones inducidas al desenergizar la bobina del relé. Gracias a sus LED indicadores, el estado de activación de cada canal puede visualizarse fácilmente durante la operación o pruebas de laboratorio.

Tabla 11. Principales especificaciones técnicas del módulo relay

Especificación	Descripción	Foto
Modelo	Módulo Relay 2 Canales (2CH) 5VDC	
Tipo de relé	Electromecánico SPDT	
Número de canales	2 (control independiente por cada canal)	
Voltaje de operación	5 V DC	
Voltaje de carga (contactos)	Hasta 250 V AC / 10 A o 30 V DC / 10 A	
Aislamiento	Óptico	
Tipo de disparo (trigger)	Activo en nivel bajo (LOW)	
Corriente de activación	15–20 mA aprox.	
Tiempo de conmutación	≤10 ms	
Indicadores LED	LED encendido por cada relé activado	
Protección	Contra picos de voltaje inversos	
Dimensiones	50 mm × 40 mm × 18 mm	

Tabla 12. Lista de precio de componentes

Componente	Cantidad	Precio unitario (S/)	IGV 18 % (S/)	Subtotal con IGV (S/)
ESP32 DevKit V1	5	38.00	34.20	224.20
Módulo Relay 2CH 5VDC	1	17.00	3.06	20.06
Sensor DHT11	4	18.00	12.96	84.96
Sensor de humedad de suelo	4	14.00	10.08	66.08
Panel solar monocristalino 5 W	5	34.00	30.60	200.60
Convertidor LM2596 (3A)	5	12.00	10.80	70.80
Módulo TP4056 (micro-USB)	5	9.00	8.10	53.10
Batería Li-Ion HI 603048	5	14.00	12.60	82.60
Convertidor MT3608 (2A)	5	12.00	10.80	70.80
Pprotoboard, jumpers, terminales	1	22.00	3.96	25.96
Totales	—	—	137.16	899.16

También se llevaron a cabo una serie de visitas al Caserío Hualtacal para determinar el estado del sistema de bombeo de agua del cultivo de maracuyá y la ubicación de los nodos de sensores y el nodo central.

Tabla 13. *Estado actual del sistema de bombeo de agua*

Elemento	Descripción	Foto
Pozo	El ingreso al pozo está cubierto de vegetación. El pozo está cubierto con calaminas para impedir el acceso y evitar caídas. Las calaminas están en mal estado, presentan óxido y corrosión.	
Tuberías	Las tuberías que trasladan el agua hacia las áreas de cultivo son de PVC y 2”. Existen dos líneas de impulsión, una para cada bomba.	
Bombas	Se utilizan dos bombas sumergibles monofásicas. Marca: Pedrollo. La primera de 3 HP, 220 V, 60 Hz. La segunda de 2 HP, 220 V, 60 Hz. Ambas cuentan con arrancador.	

El cultivo de maracuyá, como se observa en la Figura 1, se realiza en hileras con estructuras de soporte que permiten a las plantas trepadoras extenderse y distribuir sus ramas y frutos. Las plantas están bien organizadas, facilitando el acceso y la recolección de los frutos. Los frutos cuelgan abundantemente de las ramas, lo que indica un manejo adecuado del cultivo.

Figura 1. *Estado del cultivo de maracuyá*



2.4. Diseño de contrastación de hipótesis

La contrastación de la hipótesis se realizó mediante la comparación entre el proceso de monitoreo previo del cultivo de maracuyá, caracterizado por mediciones manuales no continuas y ausencia de registro histórico, y el proceso de monitoreo implementado mediante el prototipo IoT desarrollado.

La mejora del monitoreo se evaluó a través de indicadores técnicos del sistema, tales como:

- Continuidad del monitoreo (mediciones automáticas cada 10 minutos),
- Precisión de los sensores de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo,
- Estabilidad de la transmisión inalámbrica de datos,
- Capacidad de visualización remota en tiempo real,

- Respuesta automática del sistema ante valores fuera del umbral establecido.

El cumplimiento de estos indicadores permitió demostrar que el proceso de monitoreo posterior a la implementación del sistema presenta mejoras sustanciales respecto al monitoreo previo, validando así la hipótesis planteada.

III. RESULTADOS

3.1. Implementación de los nodos remotos de humedad y temperatura

Se instalaron cuatro nodos remotos dentro del cultivo de maracuyá, cada uno equipado con un microcontrolador (dos ESP32 y dos ESP8266), un sensor DHT11 para temperatura y humedad relativa, y un sensor capacitivo v1.2 para humedad del suelo. Los nodos se alimentaron mediante un sistema fotovoltaico de 5 W con batería de ion de litio (3.7 V – 800 mAh) y convertidores DC–DC.

La calibración y las pruebas iniciales se realizaron en enero de 2025, verificando el correcto funcionamiento de cada sensor antes de su instalación definitiva en campo. Posteriormente, el sistema se mantuvo operativo de enero a octubre de 2025, con un intervalo de muestreo de 10 minutos.

Las mediciones iniciales mostraron una buena estabilidad de los sensores, con variaciones menores a ± 0.2 °C en temperatura y ± 2 % en humedad relativa entre lecturas consecutivas. Los sensores de humedad del suelo registraron valores coherentes con los ciclos de riego y las condiciones climáticas de la zona.

Figura 2. Componentes de los nodos sensores (I)

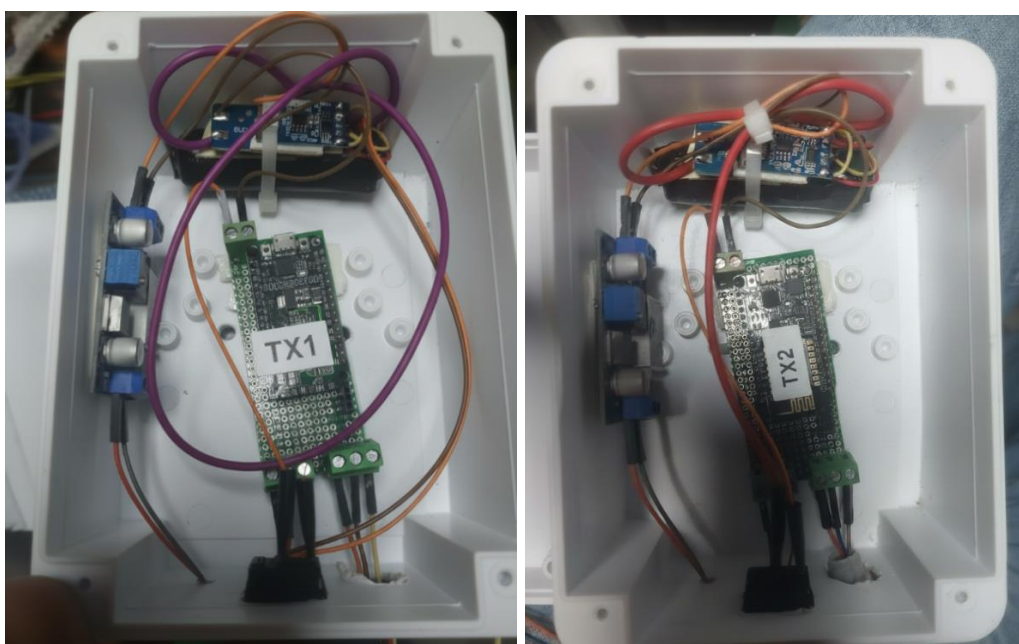


Figura 3. Componentes de los nodos sensores (II)

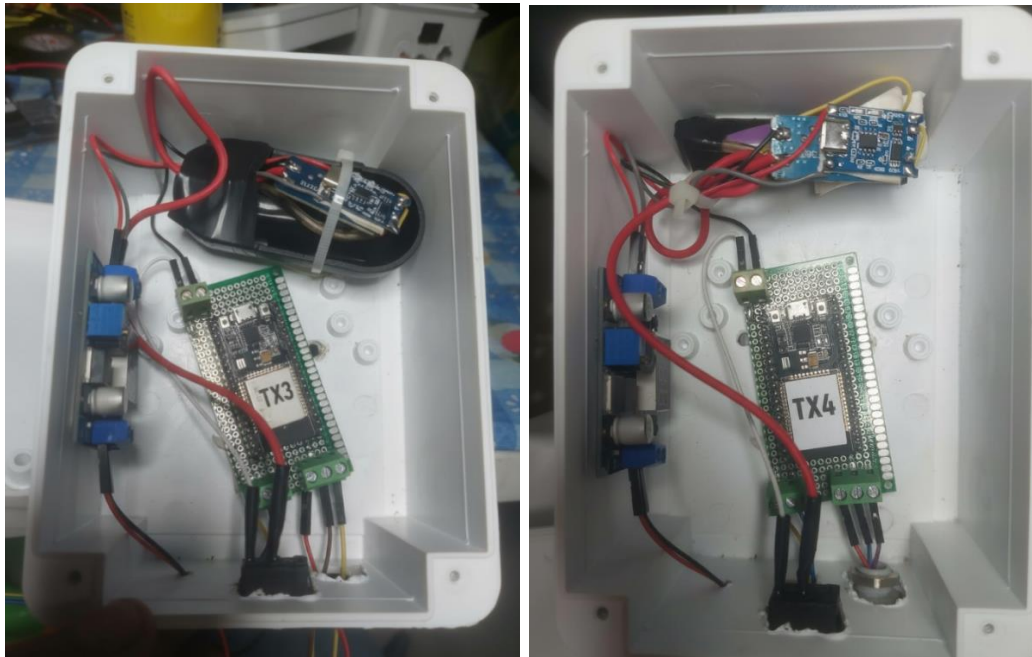


Figura 4. Esquema de conexión de los componentes de los nodos sensores

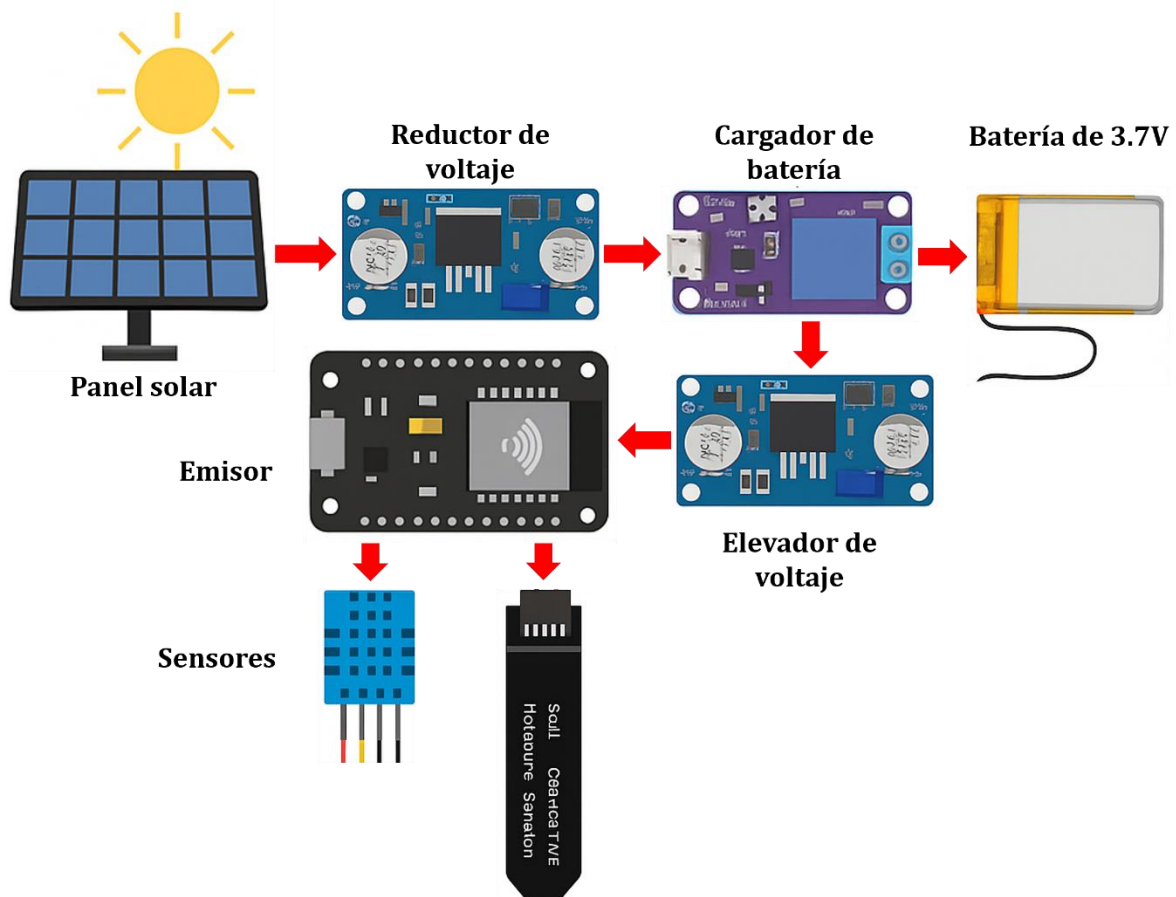


Figura 5. *Montaje de los nodos sensores en el cultivo de maracuyá*



La implementación de los nodos sensores permitió adquirir de manera continua los parámetros ambientales durante el periodo de observación, demostrando estabilidad y funcionamiento adecuado en condiciones reales de campo.

3.2. Implementación del nodo central para el monitoreo y visualización de datos de humedad y temperatura

El nodo central constituye el componente principal del sistema de monitoreo, encargado de la recepción, procesamiento y visualización de los datos ambientales provenientes de los cuatro nodos remotos instalados en el cultivo de maracuyá. Su función es consolidar las mediciones de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, facilitando su interpretación en tiempo real y permitiendo la activación automática o manual de la bomba de riego según las condiciones detectadas.

El sistema se alimenta mediante un panel solar de 5 W, cuya energía es regulada por un convertidor Step-Down LM2596, que reduce el voltaje a niveles adecuados para el módulo cargador TP4056, responsable de gestionar la carga de la batería de ion de litio de 3.7 V (modelo HI 603048). Esta batería actúa como fuente de respaldo y suministra energía estable al sistema a través de un convertidor Step-Up MT3608, el cual eleva el voltaje a 5 V para alimentar el microcontrolador ESP32, unidad encargada de la comunicación y el control general.

El ESP32 cumple la función de procesar los datos enviados por los nodos remotos y controlar el módulo relay 2CH de 5 VDC, que activa la bomba de agua cuando la humedad del suelo cae por debajo del umbral establecido (40 %). Además, este microcontrolador integra la conectividad Wi-Fi, lo que permite transmitir los datos procesados hacia una plataforma de monitoreo remoto a través de la aplicación Telegram, donde el usuario puede visualizar el estado de las variables en tiempo real y recibir alertas automáticas de activación del sistema de riego. El tiempo promedio entre envío y recepción fue de 2.8 s, con una tasa de entrega del 97 %, lo que garantiza una comunicación estable y confiable durante todo el periodo de observación.

El sistema de monitoreo opera de manera local y autónoma mediante el protocolo ESP-NOW, el cual no requiere conexión a internet para la transmisión de datos entre los nodos sensores y el nodo central. Esta característica permite que el sistema continúe funcionando de manera estable en entornos rurales con limitada o inexistente conectividad.

La visualización remota de la información a través de la aplicación Telegram se realiza únicamente cuando el nodo central dispone de conexión a internet, funcionando como una capa adicional de supervisión y notificación. Esta funcionalidad no afecta la operación básica del sistema de monitoreo y control, la cual se mantiene activa de forma independiente.

Figura 6. *Componentes del nodo central*

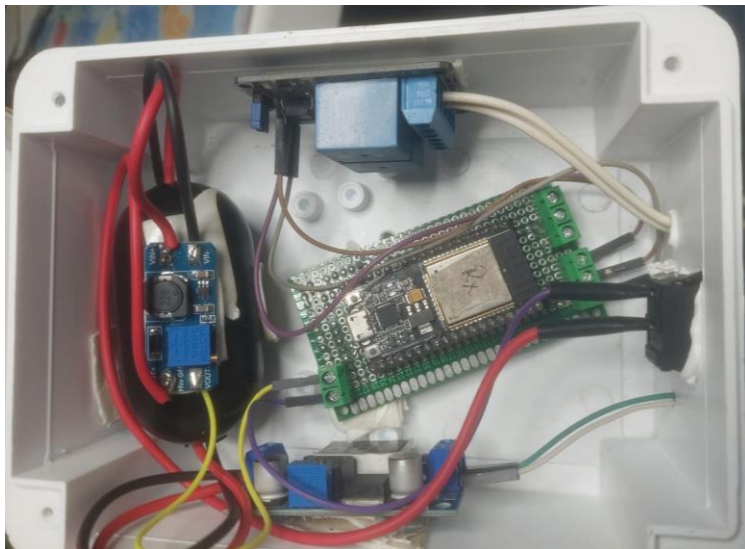


Figura 7. Esquema de conexión de los componentes del nodo central

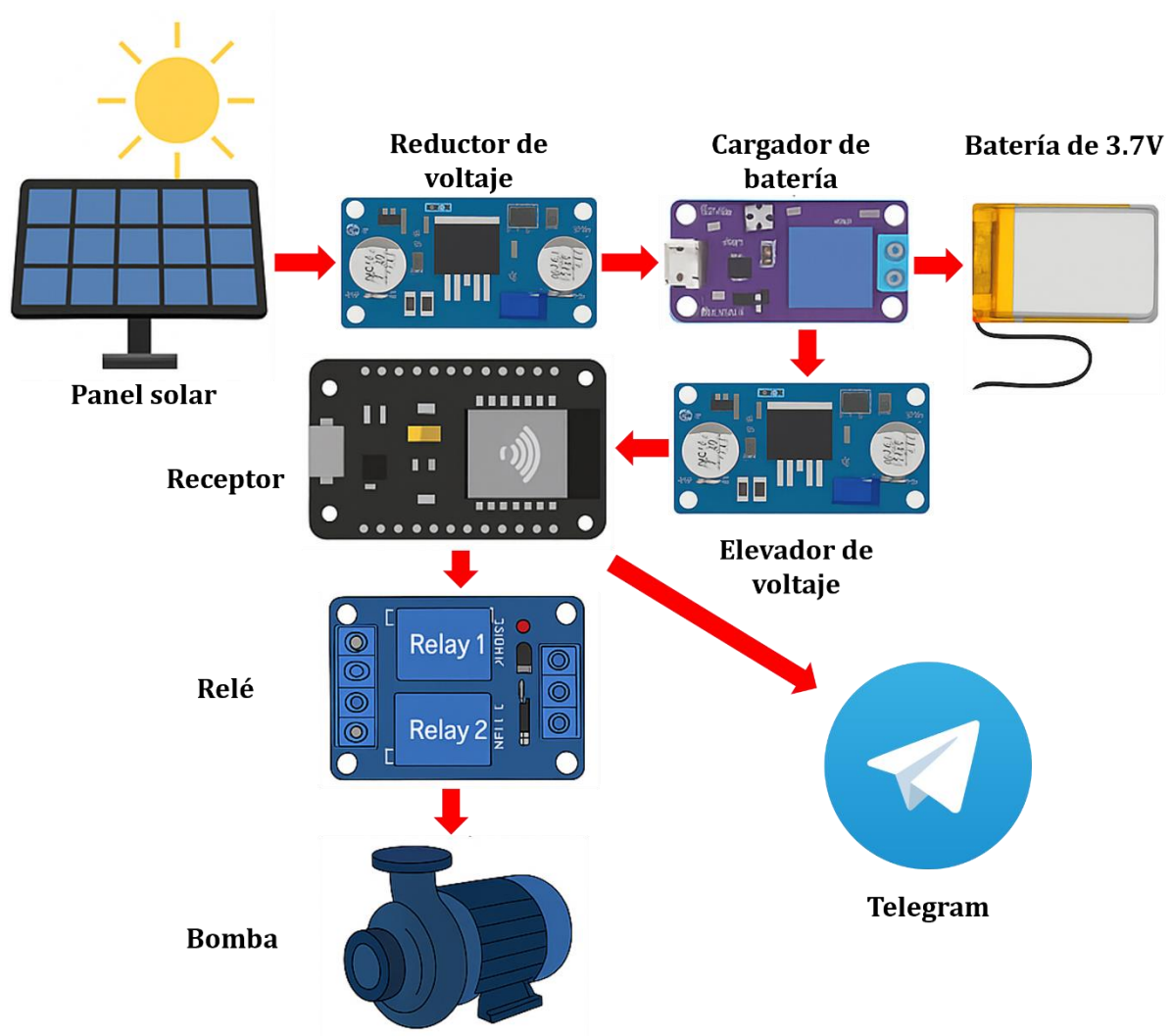


Figura 8. Montaje del nodo central en el cultivo de maracuyá



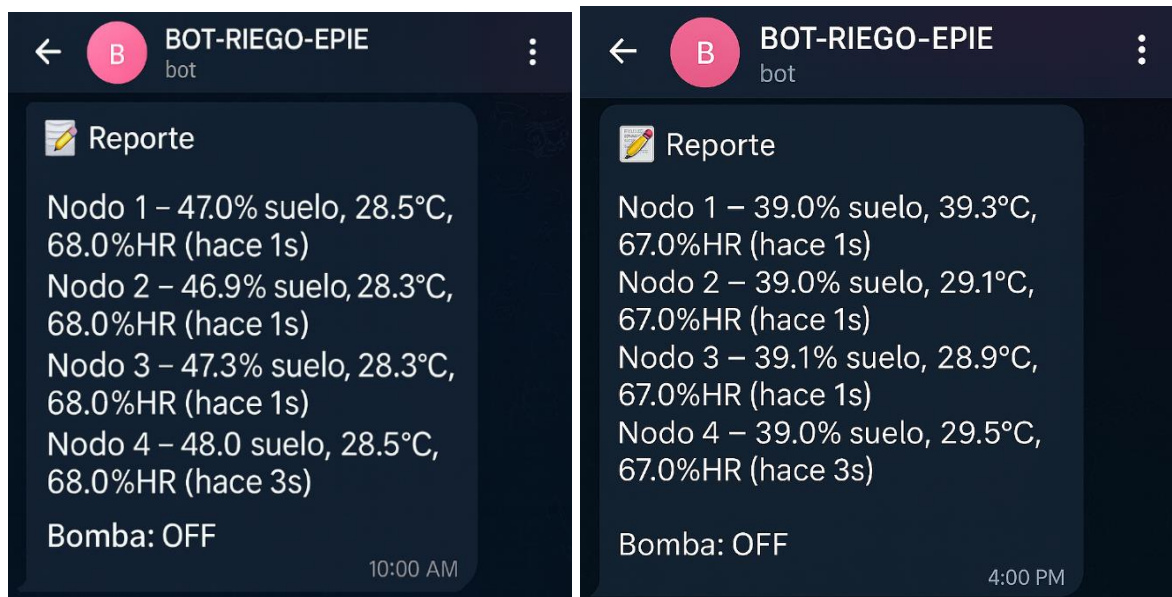
El nodo central mantuvo comunicación eficiente y estable con los nodos sensores, permitiendo el monitoreo remoto en tiempo real y la activación automática del riego, cumpliendo con los requerimientos planteados en el diseño del sistema.

Concluida la implementación del sistema, se procedió a realizar una serie de pruebas de funcionamiento y validación orientadas a verificar la correcta comunicación entre los nodos remotos y el nodo central, así como la fiabilidad de los datos adquiridos por los sensores de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Estas pruebas permitieron evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales de operación dentro del cultivo de maracuyá, ubicado en Olmos, región Lambayeque.

Figura 9. Reporte y monitoreo de datos en Telegram (I)



Figura 10. *Reporte y monitoreo de datos en Telegram (II)*



3.3. Evaluación de la estación de monitoreo remoto de humedad y temperatura

3.3.1. Precisión de medición

Se realizaron comparaciones puntuales entre las lecturas del sistema y un termohigrómetro de referencia en tres periodos representativos (febrero, junio y septiembre de 2025).

Los resultados mostraron un error medio absoluto (MAE) de 1.6 °C para temperatura y 4.3 % HR para humedad relativa, ambos dentro del rango aceptable ($\leq \pm 2$ °C y $\leq \pm 5$ % HR).

En el caso de la humedad del suelo, las lecturas fueron coherentes con las precipitaciones y con los eventos de riego detectados. En cada activación automática de la bomba, la humedad del suelo aumentó entre 5 y 12 puntos porcentuales respecto al valor previo.

Tabla 14. Resultados de precisión del sistema de medición

Parámetro	MAE	Criterio	Cumple
Temperatura (°C)	1.6	$\leq \pm 2$ °C	Sí
Humedad relativa (%)	4.3	$\leq \pm 5$ %	Sí
Humedad del suelo (%)	+8 p.p.	$\Delta \geq 5$ p.p.	Sí

El sistema demostró una alta precisión en la medición de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, cumpliendo los criterios establecidos.

3.3.2. Estabilidad de transmisión

Durante los diez meses de monitoreo, la comunicación entre nodos y nodo central se mantuvo estable, con una latencia promedio de 2.9 s y una tasa de entrega del 97 %. Las pérdidas de paquetes (3 %) se produjeron principalmente durante días de nubosidad intensa o baja carga de batería, sin comprometer la continuidad del registro.

Tabla 15. Desempeño de comunicación ESP-NOW (enero–octubre 2025)

Parámetro	Valor promedio	Criterio	Cumple
Latencia (s)	2.9	≤ 3 s	Sí
Tasa de entrega (%)	97	≥ 95 %	Sí
Pérdida de paquetes (%)	3	≤ 5 %	Sí

La estabilidad de la red fue satisfactoria, garantizando la transmisión confiable de datos y la visualización oportuna en la aplicación Telegram.

3.3.3. Consumo energético y autonomía

El sistema fue alimentado por paneles solares monocristalinos de 5 W, los cuales proporcionaron energía suficiente para mantener la operación continua de los nodos y del nodo central durante todo el periodo de monitoreo (enero–octubre 2025).

Se midió la corriente de consumo de cada nodo durante las etapas de reposo y transmisión, obteniéndose un consumo promedio de 180 mA por nodo sensor y 250 mA para el nodo central.

Considerando la capacidad de las baterías de 3.7 V – 800 mAh, y la radiación solar promedio registrada en Olmos ($\approx 5,2$ kWh/m²/día), la energía generada fue suficiente para cubrir la demanda total del sistema.

En condiciones normales, el sistema alcanzó un uptime del 93 %, es decir, permaneció operativo el 93 % del tiempo total medido, y una autonomía nocturna de 14 horas, incluso en días nublados.

Tabla 16. *Autonomía y eficiencia energética del sistema*

Parámetro	Valor	Criterio	Cumple
Corriente promedio por nodo (mA)	180	≤ 200 mA	Sí
Corriente nodo central (mA)	250	≤ 300 mA	Sí
Uptime (%)	93	≥ 90 %	Sí
Autonomía nocturna (h)	14	≥ 12 h	Sí

El sistema presentó un consumo eléctrico eficiente, manteniendo corrientes de operación dentro de los límites esperados para microcontroladores ESP32/ESP8266. Los valores obtenidos de autonomía y uptime confirman que el suministro de energía solar garantiza un funcionamiento continuo, estable y autosostenible del sistema en campo durante el periodo de monitoreo.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Desde un enfoque comparativo, los resultados obtenidos en la presente investigación pueden analizarse a la luz de diversos estudios recientes que abordan la aplicación de tecnologías IoT en el monitoreo ambiental agrícola. En general, los resultados confirman que la integración de sensores ambientales, microcontroladores y comunicación inalámbrica permite mejorar el proceso de adquisición, transmisión y supervisión de variables físicas relevantes en entornos productivos rurales.

Los hallazgos de esta investigación guardan relación con el trabajo desarrollado por Rueda y Quintero (2022), quienes implementaron un sistema embebido para el monitoreo de humedad del suelo y el registro fotográfico de cultivos de Chile. En ambos casos, el uso de tecnología embebida permitió automatizar la adquisición de datos ambientales y reducir la dependencia del monitoreo manual. No obstante, a diferencia del estudio citado, el sistema propuesto en esta tesis incorpora una lógica de control que permite la activación automática del riego en función de un umbral de humedad del suelo, fortaleciendo el control técnico del proceso de monitoreo ambiental.

De manera similar, Monge y Paguay (2022) desarrollaron un sistema IoT basado en ESP32 para el monitoreo de temperatura y humedad en cultivos de maíz, utilizando Telegram como plataforma de notificación. La presente investigación comparte esta arquitectura de comunicación; sin embargo, amplía su alcance al integrar cuatro nodos sensores distribuidos, lo que permite un monitoreo espacialmente distribuido y mejora la representatividad de los datos recolectados en distintas zonas del cultivo.

Por su parte, Chara y Llor (2022) demostraron que la automatización de la adquisición y almacenamiento de datos ambientales mejora el control operativo en sistemas acuícolas. Este principio se ve reflejado en el presente estudio, donde el monitoreo continuo de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo permite una supervisión técnica más consistente de las

condiciones ambientales, evidenciando la versatilidad del enfoque IoT en distintos sectores productivos.

En el contexto nacional, los resultados concuerdan con los obtenidos por Berrios y Rivera (2022), quienes validaron un sistema IoT para monitoreo agrícola empleando una arquitectura nodo sensor–nodo central. Ambos trabajos confirman la efectividad de este modelo para la transmisión de datos en tiempo real y la ejecución de acciones automáticas. No obstante, el sistema desarrollado en esta tesis incorpora alimentación autónoma mediante energía solar, lo que incrementa su viabilidad en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica.

Asimismo, Peñaloza y Yupanqui (2022) demostraron la viabilidad de redes inalámbricas distribuidas para el monitoreo agrícola mediante tecnologías LPWAN. Aunque el presente sistema utiliza comunicación ESP-NOW en lugar de LoRa, ambos estudios coinciden en que las arquitecturas distribuidas constituyen una alternativa eficaz para el monitoreo remoto de variables ambientales.

Finalmente, Altamirano y Merino (2022) evidenciaron el potencial del IoT para la automatización y gestión ambiental en sistemas acuícolas. Este enfoque se replica en la presente investigación, donde la lógica de control implementada en el ESP32 permitió responder automáticamente a variaciones en la humedad del suelo, reduciendo la intervención manual y mejorando la continuidad del monitoreo.

A pesar de los resultados favorables, el sistema presenta limitaciones técnicas que deben considerarse. El alcance del protocolo ESP-NOW se ve reducido en presencia de obstáculos físicos o interferencias electromagnéticas, lo que podría limitar su aplicación en áreas agrícolas de mayor extensión. Asimismo, la autonomía energética depende de la radiación solar disponible, y el sensor DHT11 presenta un margen de error superior al de sensores de mayor precisión. Estas limitaciones no afectan la validez del estudio, pero

evidencian oportunidades de mejora mediante la incorporación de tecnologías de comunicación de mayor alcance y sensores de mayor exactitud en futuras versiones del sistema.

En conjunto, la comparación con antecedentes nacionales e internacionales permite validar la hipótesis planteada, confirmando que la implementación del prototipo IoT mejora el proceso de monitoreo ambiental en el cultivo de maracuyá, al proporcionar adquisición continua de datos, comunicación inalámbrica estable y capacidad de respuesta automática, consolidándose como una solución tecnológica viable y escalable.

V. CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo IoT implementado presentó un desempeño técnico confiable durante el periodo de evaluación, permitiendo el registro continuo y estable de las variables de temperatura ambiente, humedad relativa y humedad del suelo en el cultivo de maracuyá. Las mediciones obtenidas se mantuvieron dentro de márgenes de error aceptables, evidenciando una adecuada calibración de los sensores y un proceso de adquisición de datos consistente en condiciones reales de campo.

La comunicación inalámbrica basada en el protocolo ESP-NOW mostró estabilidad y eficiencia, alcanzando una latencia promedio de 2.9 segundos y una tasa de entrega del 97 %. Asimismo, la integración con la plataforma Telegram permitió la visualización remota de los datos y la activación automática del riego cuando la humedad del suelo descendió por debajo del umbral establecido, garantizando la supervisión continua del sistema.

Desde el punto de vista energético, el prototipo operó de manera autosostenible mediante alimentación solar, con un consumo promedio de 180 mA por nodo, una autonomía nocturna de 14 horas y un uptime del 93 %, lo que confirma su viabilidad para aplicaciones agrícolas en zonas rurales con recursos energéticos limitados.

Los resultados obtenidos en términos de precisión de medición, estabilidad de comunicación y autonomía energética permiten confirmar la hipótesis general de la investigación. La implementación del sistema IoT mejoró el proceso de monitoreo de temperatura y humedad en el cultivo de maracuyá respecto al monitoreo manual previo, al proporcionar adquisición continua de datos, transmisión inalámbrica, visualización remota y respuesta automática, constituyéndose en una alternativa tecnológica práctica y escalable para el monitoreo ambiental agrícola.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar algoritmos de inteligencia artificial que permitan predecir las necesidades hídricas del cultivo en función de la humedad del suelo, temperatura y humedad relativa.

Dado que el protocolo ESP-NOW tiene un alcance limitado a unos 300 m, para futuros trabajos se sugiere emplear módulos LoRa o LoRaWAN, capaces de cubrir distancias de varios kilómetros con bajo consumo, lo que permitiría implementar la red de monitoreo en parcelas agrícolas de mayor extensión.

Se propone reemplazar el sensor DHT11 por modelos de mayor exactitud, como BME280 o SHT31, con el fin de reducir los márgenes de error y mejorar la confiabilidad del monitoreo en cultivos que requieren control microclimático más detallado.

La incorporación de servicios como Firebase, Blynk o ThingSpeak permitiría guardar registros históricos y analizar tendencias de manera remota, favoreciendo la trazabilidad y la toma de decisiones basada en datos.

Se sugiere desarrollar modelos de aprendizaje automático que analicen los datos recolectados para predecir las necesidades de riego y detectar anomalías en las condiciones ambientales. Esta evolución transformaría el sistema en una herramienta de agricultura de precisión inteligente, orientada a la optimización del recurso hídrico y la productividad agrícola.

REFERENCIAS

- Amaya Robles, J. E. (2009). *CULTIVO DE MARACUYÁ (Passiflora edulis Sims f. flavicarpa Deg.)*. Recuperado 7 de octubre de 2022, de http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/MANUAL%20DEL%20CULTIVO%20DE%20MARACUYA_0.pdf
- Arteaga Quico, A. D., y Wong Portillo, L. R. (2021). Framework para el monitoreo de la temperatura de cultivos acuícolas basado en IoT. *DYNA*, 88(218), 239-246.
- Berrios Gómez, S., y Rivera Herrera, H. J. (2022). Sistema IoT basado en ESP32 para el control y monitoreo de cultivos en invernadero con enfoque de agricultura 4.0. *INGENIERÍA INVESTIGA*, 4.
- Cuadrado Coronel, S. L. (2022). *Aplicación de la tecnología IoT (Internet of Things) para la medición de variables meteorológicas en la agricultura sostenible la tecnología IoT (Internet of Things) con sensores de bajo costo, como herramienta de monitoreo de las variables meteorológicas temperatura y humedad del suelo para la optimización del recurso hídrico en la agricultura sostenible* (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022.).
- Fernández Sosa, J. F. (2021). *Utilización de dispositivos móviles como herramienta de sensado en aplicaciones de IoT* (Tesis de Grado, Universidad Nacional de La Plata).
- Flores Zermeno, F. J., y Cossio Franco, E. G. (2021). Aplicaciones, enfoques y tendencias del Internet de las Cosas (IoT): revisión sistemática de la literatura. In *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2021 (Hidalgo, México, 20 al 22 de octubre* (Vol. 13, No. 9, pp. 568-577).
- Guerrero Ibáñez, J. A., Estrada González, F. P., Medina Tejeda, M. A., Rivera Gutiérrez, M. G., Alcaraz Aguirre, J. M., Maldonado Mendoza, C. A., y López González, V. I.

- (2017). SgreenH-IoT: Plataforma IoT para agricultura de precisión. *Sistemas, cibernética e informática*, 14(2).
- Icaza Guamba, C. A. (2021). *Análisis, diseño y desarrollo de un sistema inteligente y automatizado de monitoreo y control de cultivos con IoT. Caso de estudio: huertos urbanos* (Tesis de Grado, Quito: UCE).
- Loza González, G. A. (2021). *Factores críticos de éxito en la aplicación de la IOT al Sector Agropecuario* (Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana).
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2019). *FICHA TÉCNICA AGROCLIMÁTICA. Passiflora edulis Sims*. Recuperado 7 de octubre de 2022, de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2253262/MARACUYA.pdf>
- Monge Mora, D. F., y Paguay Ruiz, E. V. (2022). *Desarrollo de un dispositivo IoT en cloud para cultivo de maíz en la localidad de Pujilí* (Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana).
- Mosquera Meléndrez, L. M., y Cevallos Rojas, C. D. (2022). *Diseño e implementación de un Prototipo IoT para el monitoreo de parámetros ambientales aplicados al cultivo de arroz utilizando ESP32 y Thingspeak* (Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana).
- Ojo González, K., y Bonilla Morales, B. (2021). Requerimientos no funcionales para sistemas basados en el Internet de las cosas (IoT): Una revisión. *I+ D Tecnológico*, 17(2).
- Peñaloza Velásquez, J. M., y Yupanqui Gonzalo, R. (2022). *Diseño de un sistema IoT de bajo costo basado en LPWAN para cultivos hidropónicos*. (Tesis de Grado, Universidad Privada de Tacna).
- Rueda Torres, D. C., y Quintero Rojas, C. (2022). *Prototipo de servicio web para el seguimiento y control del cultivo de ají cayenne mediante una arquitectura IoT*. (Tesis de Grado, Universidad Católica de Colombia).

Yancha García, C. V. (2022). *Análisis de la implementación de una aplicación móvil para el control y monitoreo del invernadero en la faciag de la utb, año 2022* (Tesis de Grado, Babahoyo: UTB-FAFI. 2022).

Yzarra Tito, W. J. y López Ríos, F. M. (2017, 25 marzo). *Manual de observaciones fenológicas*. Recuperado 7 de octubre de 2022, de <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/272>

ANEXOS

ANEXO N° 01: PROGRAMACIÓN DE NODOS TRANSMISORES – ESP8266

```
/****** TX1 - ESP8266 (NodeMCU / Wemos D1 mini) *****/
- Envía por ESP-NOW (broadcast) cada TX_INTERVAL_MS
- Lecturas: humedad de suelo (A0), DHT11 (GPIO2 = D4)
*****/

#include <ESP8266WiFi.h>
extern "C" {
    #include <user_interface.h>    // wifi_set_channel()
}
#include <espnow.h>
#include <DHT.h>

/* ===== CONFIG ===== */
#define WIFI_CHANNEL      6
#define PIN_SOIL          A0      // ADC del ESP8266 (0-1023)
#define PIN_DHT           4       // GPIO4 (D2)
#define DHTTYPE           DHT11

// Calibración (ajústala a tu sensor/instalación)
int CAL_SECO = 900;             // lectura en aire
int CAL_MOJADO = 300;           // lectura en agua

// Promedio ADC
#define N_MUESTRAS        15
#define DELAY_ADC_MS      5
#define TX_INTERVAL_MS    3000UL // 30 s

/* ===== PAYLOAD ===== */
typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t id;
    float soil_pct;
    float temp_c;
    float hum_rh;
    uint16_t adc_raw;
} payload_t;

payload_t data;
DHT dht(PIN_DHT, DHTTYPE);

/* ===== BROADCAST ===== */
uint8_t bcastAddr[] = {0xFF,0xFF,0xFF,0xFF,0xFF,0xFF};

/* ===== CALLBACK ENVÍO (ESP8266) ===== */
void onDataSent(uint8_t* mac_addr, uint8_t status) {
```

```

// En ESP8266: status == 0 => OK
char macStr[18];
snprintf(macStr, sizeof(macStr), "%02X:%02X:%02X:%02X:%02X:%02X",
         mac_addr[0], mac_addr[1], mac_addr[2],
         mac_addr[3], mac_addr[4], mac_addr[5]);

Serial.print("ENVÍO a ");
Serial.print(macStr);
Serial.print(" → ");
Serial.println(status == 0 ? "OK" : "FALLO");
}

/* ===== SETUP ===== */
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  delay(100);

  dht.begin();

  // Modo estación y canal fijo
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.disconnect();          // importante limpiar estado
  delay(50);
  wifi_set_channel(WIFI_CHANNEL);
  Serial.print("Canal fijado: ");
  Serial.println(WIFI_CHANNEL);

  Serial.print("MAC TX1: ");
  Serial.println(WiFi.macAddress());

  // Inicializa ESP-NOW
  if (esp_now_init() != 0) {
    Serial.println("✗ Error al iniciar ESP-NOW");
    while (1) delay(10);
  }

  // Rol y callback
  esp_now_set_self_role(ESP_NOW_ROLE_CONTROLLER);
  esp_now_register_send_cb(onDataSent);

  // Agrega peer broadcast (sin cifrado)
  if (esp_now_add_peer(bcastAddr, ESP_NOW_ROLE_SLAVE, WIFI_CHANNEL, NULL, 0)
  != 0) {
    Serial.println("✗ Error agregando peer broadcast");
    while (1) delay(10);
  }

  Serial.println("✅ TX1 listo, enviando por broadcast...");
}

```

```

}

/* ===== LOOP ===== */
void loop() {
    // Promedio ADC suelo
    uint32_t sum = 0;
    for (int i = 0; i < N_MUESTRAS; i++) {
        sum += analogRead(PIN_SOIL);    // 0..1023
        delay(DELAY_ADC_MS);
    }
    float adc = float(sum) / N_MUESTRAS;

    float pct = 100.0f * (float(CAL_SECO) - adc) / float(CAL_SECO - CAL_MOJADO);
    if (!isfinite(pct)) pct = 0;
    pct = constrain(pct, 0.0f, 100.0f);

    // DHT11
    float hr = dht.readHumidity();
    float tc = dht.readTemperature();
    if (isnan(hr) || isnan(tc)) {
        hr = -1000.0f;
        tc = -1000.0f;
    }

    // Payload
    data.id      = 1;
    data.soil_pct = pct;
    data.temp_c   = tc;
    data.hum_rh   = hr;
    data.adc_raw  = uint16_t(adc);

    // Envía por broadcast
    uint8_t res = esp_now_send(bcastAddr, (uint8_t*)&data, sizeof(data));
    if (res != 0) {
        Serial.print("esp_now_send error: ");
        Serial.println(res);
    }

    // Log
    Serial.printf("[TX1] ID:%u Soil:%.1f%% Temp:%.1f°C HR:%.1f%% ADC:%u\n",
        data.id, data.soil_pct, data.temp_c, data.hum_rh,
        data.adc_raw);

    delay(TX_INTERVAL_MS);
}

```

ANEXO N° 02: PROGRAMACIÓN DE NODOS TRANSMISORES – ESP32

```
#include <WiFi.h>
#include <esp_now.h>
#include <esp_wifi.h>
#include <DHT.h>
#include <esp_idf_version.h>

// ===== CONFIGURACIÓN =====
#define WIFI_CHANNEL 6
#define PIN_SOIL 34
#define PIN_DHT 4
#define DHTTYPE DHT11

int CAL_SECO = 3000; // valor en aire
int CAL_MOJADO = 1200; // valor en agua
#define N_MUESTRAS 15
#define DELAY_ADC 5
#define TX_INTERVAL_MS 30000

// ===== PAYLOAD =====
typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t id;
    float soil_pct;
    float temp_c;
    float hum_rh;
    uint16_t adc_raw;
} payload_t;

payload_t data;
DHT dht(PIN_DHT, DHTTYPE);

// ===== BROADCAST =====
uint8_t broadcastAddress[] = {0xFF,0xFF,0xFF,0xFF,0xFF,0xFF};
esp_now_peer_info_t peerInfo;

// ===== CALLBACK ENVÍO =====
#if ESP_IDF_VERSION_MAJOR >= 5
// Core 3.x (IDF 5.x)
void OnDataSent(const wifi_tx_info_t *info, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("ENVÍO → ");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "OK" : "FALLO");
}
#else
// Core 2.x (IDF 4.x)
void OnDataSent(const uint8_t *mac_addr, esp_now_send_status_t status) {
    Serial.print("ENVÍO → ");
    Serial.println(status == ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "OK" : "FALLO");
}
```

```

#endif

// ===== SETUP =====
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    dht.begin();
    analogReadResolution(12);
    analogSetAttenuation(ADC_11db);

    // 1) STA en canal fijo
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.disconnect(true, true);
    esp_wifi_set_channel(WIFI_CHANNEL, WIFI_SECOND_CHAN_NONE);

    Serial.println("MAC TX: " + WiFi.macAddress());
    Serial.printf("Canal configurado: %u\n", WIFI_CHANNEL);

    // 2) Inicializa ESP-NOW
    if (esp_now_init() != ESP_OK) {
        Serial.println("Error ESP-NOW init");
        while (1) delay(10);
    }
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);

    // 3) Agrega peer broadcast
    memset(&peerInfo, 0, sizeof(peerInfo));
    memcpy(peerInfo.peer_addr, broadcastAddress, 6);
    peerInfo.channel = WIFI_CHANNEL;
    peerInfo.encrypt = false;
    if (esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK) {
        Serial.println("Error agregando peer broadcast");
        while (1) delay(10);
    }

    Serial.println("✅ TX listo, enviando cada 10 s...");
}

// ===== LOOP =====
void loop() {
    // Leer humedad de suelo promediando varias muestras
    uint32_t sum = 0;
    for (int i = 0; i < N_MUESTRAS; i++) {
        sum += analogRead(PIN_SOIL);
        delay(DELAY_ADC);
    }
    float adc = float(sum) / N_MUESTRAS;

```

```

    float pct = constrain(100.0 * (CAL_SECO - adc) / (CAL_SECO - CAL_MOJADO),
0.0, 100.0);

    // Leer DHT11
    float hr = dht.readHumidity();
    float tc = dht.readTemperature();
    if (isnan(hr) || isnan(tc)) { hr = tc = -1000; }

    // Preparar payload
    data.id      = 2;
    data.soil_pct = pct;
    data.temp_c   = tc;
    data.hum_rh   = hr;
    data.adc_raw  = uint16_t(adc);

    // Enviar
    esp_err_t res = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t*)&data,
sizeof(data));
    if (res != ESP_OK) {
        Serial.println("esp_now_send err: " + String(res));
    }

    // Log
    Serial.printf("[TX2] ID:%u Soil:%.1f%% Temp:%.1f°C HR:%.1f%% ADC:%u\n",
        data.id, pct, tc, hr, uint16_t(adc));

    delay(TX_INTERVAL_MS);

```

ANEXO N° 03: PROGRAMACIÓN DE NODO RECEPTOR

```
/*** RX - ESP32 + ESP-NOW + Telegram *****/
* - Recibe payloads por ESP-NOW de hasta MAX_NODES nodos.
* - Controla bomba según humedad del suelo.
* - Reporta por Telegram: /status, /on, /off, /setinterval <min>
* - Periodiza reporte automático.
* - Compatible con ESP32 core 3.x (IDF 5.x).
*****/

/

#include <WiFi.h>
#include <esp_wifi.h>
#include <esp_now.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <UniversalTelegramBot.h>

// ===== CREDENCIALES =====
const char* WIFI_SSID = "GalaxyA04";
const char* WIFI_PASS = "123456789";
const String BOT_TOKEN = "7892703867:AAHVptio04i_U1KQB-Qz-HHeGJDfYUXUsT0";
const String CHAT_ID = "5812801465"; // Para alertas automáticas

// ===== TELEGRAM =====
WiFiClientSecure client;
UniversalTelegramBot bot(BOT_TOKEN, client);

// ===== PINES / UMBRALES =====
#define RELAY_PIN 26
#define RELAY_ACTIVE_LOW true
const float HUM_START = 38.0;

// ===== TIEMPOS =====
const unsigned long RIEGO_MS = 30UL * 60UL * 1000UL;
const unsigned long REPORTE_MS = 10UL * 60UL * 1000UL;
const unsigned long POLL_MS = 2000;

// ===== PAYLOAD =====
typedef struct __attribute__((packed)) {
    uint8_t id;
    float soil_pct, temp_c, hum_rh;
    uint16_t adc_raw;
} payload_t;

// ===== ESTADO DE NODOS =====
#define MAX_NODES 4
struct NodeState {
    bool valid = false;
    payload_t d;
};
```

```

    unsigned long lastSeen = 0;
};
NodeState nodes[MAX_NODES];

// ===== ESTADO BOMBA =====
bool        bombaOn      = false;
unsigned long tInicio     = 0;
unsigned long tLastReport = 0;
unsigned long tLastPoll   = 0;

// ===== HELPERS =====
String ageStr(unsigned long msAgo) {
    unsigned long s = msAgo / 1000UL;
    unsigned int  m = s / 60U;
    unsigned int  r = s % 60U;
    if (m > 0) return String(m) + "m " + String(r) + "s";
    return String(r) + "s";
}

void sendTG(const String &m) { // A chat fijo
    bot.sendMessage(CHAT_ID, m, "Markdown");
}

bool sendTGto(const String &chatId, const String &m) { // Respuesta a quien
escribe
    return bot.sendMessage(chatId, m, "Markdown");
}

String makeReport() {
    unsigned long now = millis();
    String s = "📋 *Reporte*\n";
    for (int i = 0; i < MAX_NODES; i++) {
        int id = i + 1;
        if (nodes[i].valid) {
            auto &d = nodes[i].d;
            s += "\n• Nodo " + String(id) +
                " - " + String(d.soil_pct, 1) + "% suelo, " +
                String(d.temp_c, 1) + "°C, " +
                String(d.hum_rh, 1) + "%HR" +
                " (ADC:" + String(d.adc_raw) +
                ", hace " + ageStr(now - nodes[i].lastSeen) + ")";
        } else {
            s += "\n• Nodo " + String(id) + " - _sin datos todavía_";
        }
    }
    s += "\n\n*Bomba:* " + String(bombaOn ? "ON" : "OFF");
    if (bombaOn) {
        float e = (now - tInicio) / 60000.0;
    }
}

```

```

    float rem = (RIEGO_MS > (now - tInicio)) ? (RIEGO_MS - (now - tInicio)) /
60000.0 : 0;
    s += "\n_Riego: " + String(e, 1) + "min";
    s += "\n_Faltan: " + String(rem, 1) + "min";
}
return s;
}

// ===== CALLBACK ESP-NOW (core 3.x) =====
void onReceive(const esp_now_recv_info* info, const uint8_t* buf, int len) {
    if (len < (int)sizeof(payload_t)) return;
    payload_t incoming;
    memcpy(&incoming, buf, sizeof(payload_t));

    int i = incoming.id - 1;
    if (i < 0 || i >= MAX_NODES) return;

    nodes[i].valid      = true;
    nodes[i].d          = incoming;
    nodes[i].lastSeen = millis();

    Serial.printf("📡 Nodo %u (ch=%d) desde %02X:%02X:%02X:%02X:%02X:%02X | "
        "Soil:%.1f%% Temp:%.1f°C HR:%.1f%%\n",
        incoming.id,
        info->rx_ctrl->channel,
        info->src_addr[0], info->src_addr[1], info->src_addr[2],
        info->src_addr[3], info->src_addr[4], info->src_addr[5],
        incoming.soil_pct, incoming.temp_c, incoming.hum_rh);
}

// ===== SETUP =====
void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(RELAY_PIN, RELAY_ACTIVE_LOW ? HIGH : LOW);

    // 1) Conectar STA a hotspot
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
    Serial.print("Conectando STA");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        Serial.print(".");
        delay(250);
    }
    Serial.printf("\n✅ STA OK, IP: %s\n", WiFi.localIP().toString().c_str());
    Serial.printf("📶 Canal asociado a hotspot: %d\n", WiFi.channel());
}

```

```

// 2) Inicia ESP-NOW (se queda en el mismo canal)
if (esp_now_init() != ESP_OK) {
    Serial.println("✗ Error init ESP-NOW");
    while (1) delay(10);
}
esp_now_register_recv_cb(onReceive);
Serial.println("📡 ESP-NOW listo");

client.setInsecure();
client.setTimeout(15000);

tLastReport = millis();
tLastPoll    = millis();

sendTG("🔧 RX iniciado y listo.");
}

// ===== LOOP =====
void loop() {
    unsigned long now = millis();

    // --- Control automático bomba ---
    if (!bombaOn) {
        for (int i = 0; i < MAX_NODES; i++) {
            if (nodes[i].valid && nodes[i].d.soil_pct <= HUM_START) {
                digitalWrite(RELAY_PIN, RELAY_ACTIVE_LOW ? LOW : HIGH);
                bombaOn = true; tInicio = now;
                sendTG("🔧 Bomba ON (auto)");
                break;
            }
        }
    }
    else if (now - tInicio >= RIEGO_MS) {
        digitalWrite(RELAY_PIN, RELAY_ACTIVE_LOW ? HIGH : LOW);
        bombaOn = false;
        sendTG("⏸ Bomba OFF (30 min)");
    }

    // --- Reporte periódico ---
    if (now - tLastReport >= REPORTE_MS) {
        sendTG(makeReport());
        tLastReport = now;
    }

    // --- Comandos Telegram ---
    if (now - tLastPoll >= POLL_MS) {
        int c = bot.getUpdates(bot.last_message_received + 1);
        for (int i = 0; i < c; i++) {
            String chatId = bot.messages[i].chat_id;

```

```

String cmd    = bot.messages[i].text;

if (cmd == "/status") {
    sendTGto(chatId, makeReport());
}
else if (cmd == "/on") {
    digitalWrite(RELAY_PIN, RELAY_ACTIVE_LOW ? LOW : HIGH);
    bombaOn = true; tInicio = now;
    sendTGto(chatId, "👉 Bomba ON (manual)");
}
else if (cmd == "/off") {
    digitalWrite(RELAY_PIN, RELAY_ACTIVE_LOW ? HIGH : LOW);
    bombaOn = false;
    sendTGto(chatId, "👉 Bomba OFF (manual)");
}
else if (cmd.startsWith("/setinterval ")) {
    int m = cmd.substring(13).toInt();
    if (m >= 1 && m <= 120) {
        REPORTE_MS = (unsigned long)m * 60000UL;
        sendTGto(chatId, "🕒 Intervalo de reporte: " + String(m) + " min");
    }
}
}
tLastPoll = now;
}

delay(10);

```