

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS



TESIS

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
INTELIGENTE CON COMUNICACIÓN BIDIRECCIONAL PARA
LA ADMINISTRACIÓN DEL RIEGO DE UN CULTIVO DE
ORQUÍDEAS EN LA CIUDAD DE CAJAMARCA”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
DE SISTEMAS**

AUTOR:

Jorge Luis Chicoma Gamarra

ASESORA:

Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz

CAJAMARCA - PERÚ 2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: Bach. JORGE LUIS CHICOMA GAMARRA.

DNI: 46159352

Escuela Profesional: Ingeniería de Sistemas

2. Asesor: Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz

Facultad: Ingeniería

3. Grado académico o título profesional

☐ Bachiller

☒ Título profesional

☐ Segunda especialidad

☐ Maestro

☐ Doctor

4. Tipo de Investigación:

☒ Tesis

☐ Trabajo de investigación

☐ Trabajo de suficiencia profesional

☐ Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE CON COMUNICACIÓN
BIDIRECCIONAL PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL RIEGO DE UN CULTIVO DE ORQUÍDEAS
EN LA CIUDAD DE CAJAMARCA"

6. Fecha de evaluación: 05/03/2026

7. Software antiplagio:

☒ TURNITIN

☐ URKUND (OURIGINAL) (*)

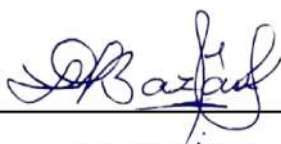
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 8%

9. Código Documento: oid:3117:564214011

10. Resultado de la Evaluación de Similitud:

☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 06/03/2026



FIRMA DEL ASESOR

Nombre: BAZÁN DÍAZ, Laura Sofía
DNI: 40002605



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 06/03/2026 07:38:46-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0130-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto en el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería da a conocer que, a los **diez días del mes de marzo de 2026**, siendo las quince horas (3:00 p.m.) en la Aula N° 8 (Edificio 4K), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín.
Vocal : M.Cs. Ing. Néstor Elías Muñoz Abanto.
Secretario : Dr. Ing. Roger Manuel Sánchez Chávez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE CON COMUNICACIÓN BIDIRECCIONAL PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL RIEGO DE UN CULTIVO DE ORQUÍDEAS EN LA CIUDAD DE CAJAMARCA*, presentado por el Bachiller en Ingeniería de Sistemas *JORGE LUIS CHICOMA GAMARRA*, asesorado por la Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA :07..... PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA :11..... PTS.
EVALUACIÓN FINAL :18..... PTS.Dieciocho (En letras)

En consecuencia, se lo declaraAprobado con el calificativo deDieciocho.....
acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las4:52pm horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Carlos Jesús Koo Labrín.
Presidente

M.Cs. Ing. Néstor Elías Muñoz Abanto.
Vocal

Dr. Ing. Roger Manuel Sánchez Chávez.
Secretario

Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz.
Asesora

COPYRIGHT © 2026
Jorge Luis Chicoma Gamarra
Todos los Derechos Reservados ®

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor constante, motivación y apoyo incondicional, y por acompañarme con fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mis hermanos y sobrinos, por su presencia, sonrisas y experiencias compartidas, que han sido impulso y alegría en este camino.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida, la familia que me dio, así como por las personas, oportunidades y experiencias vividas.

A mi asesora de tesis, Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz, por su orientación, apoyo y compromiso en el presente trabajo.

A la Escuela de Ingeniería de Sistemas.

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN.....	x
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
2.1 Antecedentes teóricos	4
2.2 Bases teóricas	6
2.2.1 Teoría sobre sistemas de control digital	6
2.2.2 Teoría de la lógica difusa.....	6
2.2.3 Sistema	7
2.2.4 Sistema de control inteligente.....	7
2.2.5 Comunicación bidireccional	8
2.2.6 Sistema de riego automatizados.....	9
2.2.7 Clases de sistemas de riego.....	9
2.2.8 Domótica	11
2.2.9 Automatización	11
2.2.10 Sistema electrónico	12
2.2.11 Microcontrolador	12
2.2.12 Algoritmo	13
2.2.13 La administración de riego.....	13
2.2.14 Contenido de humedad relativa del suelo	13
2.2.15 Métodos para medir la humedad en el suelo	14
2.2.17 Orquídeas temperatura y humedad	15
2.2.18 Arquitectura IoT por capas.....	16
2.2.19 Sistema embebido	16
2.2.20 Computación en el borde (Edge computing)	16
2.2.21 Modelo cliente–servidor en sistemas IoT	17
2.2.22 Arquitectura por subsistemas en sistemas de riego automatizado.....	17
2.2.23 Integración hardware–software en sistemas ciberfísicos	17
2.3 Definición de términos básicos	18
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1 Descripción del área experimental.....	21
3.2 Materiales y dispositivos utilizados en el proyecto	21
3.3 Procedimiento.....	22
3.3.1 Conceptualización de las especificaciones modelo	22
3.3.2 Arquitectura de Software	22
3.3.3 Arquitectura del hardware.....	24

3.3.4	Arquitectura integrada hardware - software	24
3.4	Requerimientos funcionales y no funcionales del sistema y de los componentes del diseño.	25
3.5	Metodología de diseño e implementación del sistema inteligente.	26
3.6	Metodología del mejoramiento de sistemas	27
3.6.1	Diagrama de flujo del control de electroválvula.....	28
3.6.2	Subsistema de sensores	29
3.6.3	Subsistema de lógico y control	29
3.6.4	Selección del tipo de comunicación	30
3.6.5	Interacción del usuario con sistema.....	30
3.6.6	Interfaz de sensores	31
3.6.7	Interfaz de lecturas grabadas	32
3.6.8	Interfaz de gráficas	33
3.7	Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados	34
3.7.1	Tratamiento	34
3.7.2	Análisis de datos	38
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		39
4.1	Resultados del objetivo específico 1: Identificar los componentes tecnológicos adecuados a utilizar en el sistema inteligente	39
4.2	Resultados del objetivo específico 2: Realizar el diseño apropiado para el desarrollo del sistema inteligente.	45
4.3	Resultados del objetivo específico 3: Evaluar el comportamiento y funcionamiento integral del sistema.	52
4.4	Resultados del objetivo general: Determinar la influencia de la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca.	63
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		75
5.1	Conclusiones	75
5.2	Recomendaciones	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		78
ANEXOS.....		85
Anexo 1: Matriz de consistencia		86
Anexo 2: Ficha de inspección		87
Anexo 3: Ficha de registros temporales.....		88
Anexo 4: Ficha de Cotejo.....		89
Anexo 5: Validación de Ficha de inspección		90
Anexo 6: Validación de Ficha de inspección – experto agrónomo.....		92
Anexo 7: Muestra de Datos del prototipo 1 (2 macetas – riego por micro goteo)		94

Anexo 8: Muestra de Datos del prototipo 2 (20 maceta – riego por micro goteo)	95
Anexo 9: Muestra de Datos del prototipo 3 (10 macetas – riego por micro aspersión) 96	
Anexo 10: Estadísticos descriptivos por cada prototipo	97

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. ESTABLECIMIENTO DE LA HUMEDAD DE LA TIERRA POR EL TACTO	14
TABLA II. TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA EL CULTIVO DE ORQUÍDEAS	16
TABLA III. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Y NO FUNCIONALES.....	26
TABLA IV. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	36
TABLA V. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DE SISTEMA DEL RIEGO.....	53
TABLA VI. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO – PROTOTIPO 1 (2 MACETAS, MICRO GOTEÓ)	53
TABLA VII. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO – PROTOTIPO 2 (20 MACETAS, MICRO GOTEÓ)	56
TABLA VIII. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO – PROTOTIPO 3 (10 MACETAS, MICRO ASPERSIÓN)	59
TABLA IX. COMPARACIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO EN TRES PROTOTIPOS CON DIFERENTES NÚMEROS DE MACETAS Y TIPO DE RIEGO	62
TABLA X. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PROTOTIPO 1.....	64
TABLA XI. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PROTOTIPO 2.....	64
TABLA XII. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PROTOTIPO 3.....	64
TABLA XIII. DESCRIPTIVOS DIARIOS POR PROTOTIPO (TODOS LOS DÍAS). N (BLOQUES) = 166.....	65
TABLA XIV. INTENSIDAD DIARIA CUANDO HAY RIEGO (>0).....	65
TABLA XV. PRUEBA DE FRIEDMAN POR MÉTRICA.....	66
TABLA XVI. COMPARACIONES MÚLTIPLES POST-HOC (NEMENYI; P-VALORES AJUSTADOS).....	66
TABLA XVII. EFECTOS PAREADOS COMPLEMENTARIOS (HL Y RANK-BISERIAL)	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Comunicación Bidireccional.....	9
Fig. 2 Riego por gravedad.	10
Fig. 3 Riego por aspersión.....	10
Fig. 4 Riego por goteo	11
Fig. 5 Microcontrolador	12
Fig. 6 Descripción del área experimental.....	21
Fig. 7 Arquitectura de software	23
Fig. 8 Arquitectura hardware	24
Fig. 9 Arquitectura integrada hardware - software	25
Fig. 10 diagrama de flujo de control de electroválvula.	28
Fig. 11 Diagrama del subsistema de sensores	29
Fig. 12 Diagrama del subsistema de lógico	29
Fig. 13 Interfaz de inicio del aplicativo	30
Fig. 14 Interfaz de sensores y edición de parámetros de riego.....	31
Fig. 15 Interfaz de lecturas grabadas	32
Fig. 16 Interfaz de gráficas	33
Fig. 17 Módulo de potencia conectado a Placa MB – 102	39
Fig. 18 Fuente de alimentación 12v.....	40
Fig. 19 ESP32 ESP-WROOM-32 CP2102 38 pines Tipo-C.....	40
Fig. 20 Figura Cable USB a tipo C.....	41
Fig. 21 Sensor de Humedad de suelo Capacitivo	41
Fig. 22 DS18B20 Kit de módulo de sensor de temperatura con sonda de acero inoxidable impermeable.....	42
Fig. 23 Sensor de humedad relativa y temperatura DHT 22	42
Fig. 24 Electroválvula solenoide 1/2" 12v, normalmente cerrada.....	43
Fig. 25 Módulo relé 5V.....	43
Fig. 26 Pantalla LCD 128x64 GME 12864-11	43
Fig. 27 Sensor de flujo de agua YF-S201	44
Fig. 28 Micro Aspersores.....	44
Fig. 29 Manguera micro porosa - riego micro goteo	45
Fig. 30 Cable UTP Categoría 6.....	45
Fig. 31 Prueba lógica de conexión Wifi y control de sensores en ESP 32 en IDE Arduino.	47
Fig. 32 Implementación de lógica difusa en ESP32 para control de riego.	48

Fig. 33 Interfaz del Fuzzy Logic Designer	49
Fig. 34 Variable difusa de entrada: humedad relativa	50
Fig. 35 Variable difusa de entrada: humedad del suelo	50
Fig. 36 Funciones de pertenencia para el tiempo de apertura de la válvula	51
Fig. 37 a) Superficie de decisión difusa - baja humedad relativa y b) superficie de decisión difusa – alta humedad relativa	52
Fig. 38 Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 1	55
Fig. 39 Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 2	58
Fig. 40 Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 3	61
Fig. 41 Condiciones de salud de orquídeas – Prototipo 1.....	68
Fig. 42 Crecimiento de orquídeas – Prototipo 1.....	68
Fig. 43 Condiciones de salud de orquídeas – Prototipo 2.....	69
Fig. 44 Crecimiento de orquídeas – Prototipo 2.....	69
Fig. 45 Condiciones de salud de orquídeas – Prototipo 3.....	70
Fig. 46 Crecimiento de orquídeas – Prototipo 3.....	70
Fig. 47 Condiciones de salud de orquídeas – Tres prototipos	71
Fig. 48 Crecimiento de orquídeas – Tres prototipos	71

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo determinar la influencia de la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de orquídeas en la ciudad de Cajamarca, con énfasis en el control de la humedad del sustrato y la optimización del proceso de riego. La investigación fue de tipo aplicada, de alcance explicativo y diseño cuasi experimental comparativo. Se desarrolló un sistema de riego inteligente basado en un microcontrolador ESP32, sensores de humedad del suelo, temperatura ambiente, humedad relativa y flujo de agua, empleando lógica difusa para ajustar dinámicamente la apertura de la electroválvula según parámetros definidos por el usuario. Los datos se recopilaron mediante observación, inspección técnica y registros instrumentales en tres prototipos (P1, P2 y P3), y se analizaron con estadística descriptiva e inferencial. En términos operativos, el sistema mantuvo la humedad del sustrato en rangos adecuados, manteniendo la humedad del sustrato en rangos adecuados (medianas entre 73% y 82%, con mejor desempeño del Prototipo 3). El análisis inferencial evidenció que el consumo diario por maceta no presentó diferencias significativas entre prototipos ($p = 0.101$), mientras que la humedad del sustrato presentó diferencias altamente significativas a favor del Prototipo 3 ($p < 0.0001$). No se registraron condiciones deficientes en el desarrollo y salud de las orquídeas, predominando estados de condición buena y excelente. El sistema demostró fiabilidad y ajuste automático, destacando el Prototipo 3 por su mejor regulación de humedad sin incrementar el consumo diario por maceta.

Palabras clave: Sistema de riego inteligente, administración de agua, IoT agrícola, control automático.

ABSTRACT

This study aimed to determine the influence of implementing an intelligent control system with bidirectional communication on the management of orchid irrigation in the city of Cajamarca, with particular emphasis on substrate moisture control and optimization of the irrigation process. The research was applied in nature, with an explanatory scope and a comparative quasi-experimental design. A smart irrigation system was developed based on an ESP32 microcontroller and sensors for soil moisture, ambient temperature, relative humidity, and water flow, using fuzzy logic to dynamically adjust solenoid valve opening according to user-defined parameters. Data were collected through observation, technical inspection, and instrumental records across three prototypes (P1, P2, and P3), and analyzed using descriptive and inferential statistics. Operationally, the system maintained substrate moisture within appropriate ranges (median values between 73% and 82%, with Prototype 3 showing the best performance). Inferential analysis indicated that daily water consumption per pot did not differ significantly among prototypes ($p = 0.101$), whereas substrate moisture differed highly significantly in favor of Prototype 3 ($p < 0.0001$). No deficient conditions were observed in orchid development and health, with good and excellent condition ratings predominating. Overall, the system demonstrated reliability and automatic adjustment, with Prototype 3 standing out for improved moisture regulation without increasing daily water consumption per pot.

Keywords: Intelligent irrigation system, water management, agricultural IoT, automatic control.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial ha generado diversos problemas en las actividades productivas, entre ellos la disponibilidad, calidad, administración y seguridad del recurso hídrico. Este aspecto se ha convertido en un factor esencial para el desarrollo humano y la sostenibilidad ambiental y económica. La Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) considera que el agua es un recurso renovable y, aunque aparentemente abundante en la Tierra, es limitado y se encuentra en proceso de agotamiento. Se estima que casi el 70 % del agua dulce a nivel mundial es consumida por la actividad agrícola; sin embargo, más del 50 % de los países utilizan este recurso de manera ineficiente [1].

Según la difusión de World Economic Forum en la Reunión Anual del Foro Económico Mundial en Davos y la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua, con información del organismo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) de las Naciones Unidas indica que, en Latinoamérica, algunas ciudades han implementado tecnologías para el racionamiento del agua en la agricultura, sector que consume más del 80 % del agua dulce en la región. Investigaciones han demostrado que los agricultores pueden incrementar la eficiencia en un 20% mediante tecnologías que faciliten la toma de decisiones basadas en datos. No obstante, la adopción tecnológica en este campo ha sido lenta: solo el 12 % de los agricultores emplea herramientas tecnológicas para determinar cómo, cuándo y cuánto irrigar para mantener al cultivo en un adecuado nivel de humedad [2].

En el Perú, pese a la amplia diversidad de recursos naturales, persisten desafíos en la gestión del recurso hídrico, especialmente en el sector agrícola, donde el riego suele ejecutarse con prácticas poco tecnificadas y con monitoreo limitado. Factores como el cambio climático, el crecimiento demográfico y debilidades en la gestión del riego incrementan la necesidad de soluciones que mejoren el control operativo y la toma de decisiones basadas en información. Adicionalmente, la distribución hídrica es desigual: aunque la región costera concentra a más del 55 % de la población, dispone de menos del 2 % del suministro de agua dulce [3]. En este contexto, la incorporación de sistemas de monitoreo y control automatizado del riego contribuye a un uso más eficiente y trazable del agua aplicada y la humedad de suelo del cultivo.

Según información difundida por ESAN, en los últimos años el Perú ha consolidado una agricultura de exportación con expansión del riego tecnificado: se reportan más de 255 000 ha bajo riego por goteo, concentradas principalmente en la costa (31%), con potencial de optimizar alrededor de 20% las inversiones en tecnología, insumos y fertilización. No obstante, la adopción sigue siendo limitada: un estudio del Programa de Formación Agraria y de Apoyo al Emprendimiento Juvenil en el Perú (2023) indica que 75% de agricultores no emplea tecnología de riego, 69% gestiona el agua de forma ineficiente y 56% de suelos presenta salinización, afectando la productividad [4].

De acuerdo con la información difundida en la Convención de Minera de PERUMIN basada en datos oficiales del sector agrario [5], cerca del 92% de la agricultura en Cajamarca es familiar y presenta baja competitividad por debilidades en la gestión del agua, escaso acceso a innovación, limitada incorporación tecnológica y reducida inversión. Aunque la región destaca por su extensión agrícola, su superficie cultivable es comparativamente menor y, pese a la presencia de cuerpos de agua (23,4% del territorio), persisten restricciones de disponibilidad en parte del área terrestre. En este contexto, se vuelve clave impulsar la tecnificación del riego mediante monitoreo y control, para mejorar decisiones operativas y sostener la humedad del suelo en rangos adecuados, lo que respalda el enfoque de automatización con sensores y control inteligente [6]. En Cajamarca, el cultivo de orquídeas requiere mantener una humedad de sustrato adecuada para preservar su desarrollo y estado sanitario; no obstante, el riego suele realizarse de manera manual y con monitoreo discontinuo, lo que dificulta ajustar oportunamente la humedad del sustrato, debido a la ausencia de un sistema inteligente con comunicación bidireccional que controle la humedad dentro de rangos óptimos, registre la operación de riego y habilite la configuración de parámetros, disminuya la variabilidad del proceso y favorezca el desarrollo del cultivo. Ante ello, surgió la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca? Asimismo, se formularon las siguientes interrogantes específicas: a) ¿Cuáles son los componentes tecnológicos adecuados a utilizar en el sistema inteligente?, b) ¿Cuál es el diseño apropiado para el desarrollo del sistema inteligente? y c) ¿Cuál es el comportamiento y

funcionamiento integral del sistema?

El estudio se justifica teóricamente porque aporta evidencia sobre la automatización del riego mediante sensores y control inteligente orientado a regular la humedad del sustrato, contribuyendo al desarrollo de soluciones IoT y al control de procesos agrícolas. Desde el punto de vista práctico, es relevante porque facilita el monitoreo y ajuste del riego con comunicación bidireccional, mejorando la consistencia operativa del proceso y favoreciendo un uso más racional del agua, con potencial de adaptación a otros cultivos.

En el aspecto metodológico, el diseño y la implementación del sistema se realizaron bajo estándares internacionales (ISO 42001) [7], tomando como referencia algunos principios como: **alcance**: el “sistema de IA” lógica difusa + decisión de riego, **riesgos y tratamiento**: identificar fallas de sensores, fallas de conectividad, datos erróneos, calibración, decisiones de riego inadecuadas, véase tabla IX, **trazabilidad**: registro lecturas, decisiones y eventos de riego, como se muestra en anexos 6, 7 y 8, **monitoreo**: autonomía, tasa de error, humedad en rango, volumen de agua suministrada, véase tabla IX, **mejora continua**: se realizaron ajustes durante el período de pruebas.

Se implementaron tres prototipos del sistema con sus respectivos cultivos experimentales de orquídeas, utilizando un suministro constante de agua mediante tuberías estándar, lo que permitió realizar pruebas, calibraciones y mejoras del software. La aplicación desarrollada requirió conexión a internet para visualizar datos de sensores y ajustar parámetros de riego. Entre las limitaciones se identificaron la dependencia de dispositivos Android, incompatibilidades entre versiones de librerías del microcontrolador y dificultades asociadas al costo, disponibilidad o adecuación de algunos equipos. Para responder a las preguntas de investigación, se estableció el siguiente objetivo general: Determinar la influencia de la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca. Asimismo, se plantearon los siguientes objetivos específicos: a) identificar los componentes tecnológicos adecuados a utilizar en el sistema inteligente, b) realizar el diseño apropiado para el desarrollo del sistema inteligente y c) evaluar el comportamiento y funcionamiento integral del sistema.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos

Dentro de los antecedentes internacionales, Chuga [8], desarrolló un estudio en Ecuador con el objetivo de diseñar e implementar un sistema de riego inteligente basado en IoT para optimizar los tiempos de irrigación en la agricultura urbana. Este modelo integró sensores de saturación y temperatura para recopilar datos clave, configurando un sistema en circuito cerrado. La información obtenida se centralizó y transmitió mediante protocolos de comunicación inalámbrica en la nube. El sistema incluyó un tanque de agua con detectores de nivel que enviaban alertas en tiempo real. Al compararlo con los métodos convencionales de riego, se evidenció un aumento del 54% en la productividad y una mayor eficiencia en el uso de los recursos.

De manera similar, Villazante [9], en Bolivia, diseñó un modelo de riego automatizado y económico para pequeños y medianos agricultores. Este sistema se desarrolló en cinco etapas: diseño, elaboración del prototipo, construcción del modelo, pruebas e integración. Un sensor calibrado medía la humedad del suelo para garantizar lecturas precisas. Al comparar el riego convencional con el sistema automatizado, se logró reducir el consumo de agua en un 27% y el tiempo de riego en un 22%, evidenciando una mayor eficiencia en el proceso de irrigación.

Por otro lado, Hidalgo y Tumbaco [10], en su estudio realizado en Ecuador, analizaron la humedad en cultivos de rosas en un invernadero sin riego mecanizado con el fin de optimizar el uso del agua. Para ello, utilizaron un modelo que recopilaba datos de sensores ambientales, como temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo. Implementaron un sistema de irrigación mecanizado basado en lógica difusa como herramienta de inteligencia artificial, el cual interactuaba con aplicaciones móviles. Esto permitió un monitoreo preciso de las condiciones del cultivo y la activación del riego según la lógica programada. Se concluyó que el tiempo de irrigación manual fue de 6 minutos, mientras que el mecanizado lo redujo a 3.41 minutos. Asimismo, el consumo de agua en el riego manual representó el 66.67%, mientras que en el mecanizado se limitó al 33.33%.

Barramuño [11], en Chile, diseñó un modelo de irrigación mecanizada para optimizar la administración del agua en un jardín interior. Se empleó un software gratuito y de bajo costo, escalable y de fácil implementación. La sistematización del proceso se realizó mediante una tarjeta Arduino, que obtenía datos del suelo a través de sensores de humedad y temperatura. El sistema permitía tomar decisiones automáticas, como abrir y cerrar válvulas según las necesidades del cultivo. Este modelo mejoró el control del riego, reduciendo el consumo de agua en un 30% y aumentando el rendimiento de los sembríos en un 25%. No obstante, su aplicación se restringió a áreas pequeñas, aunque su diseño podría ampliarse incorporando accesorios más potentes para cultivos de mayor extensión.

En cuanto a los antecedentes nacionales, Carrillo y Miranda [12], en Lima, implementaron un modelo de irrigación inteligente para un jardín urbano empleando IoT. Su estudio concluyó que el modelo denominado *HydroTI* permitió reducir el consumo de agua gracias al uso de sensores y a un plan de riego con límites establecidos. Se implementaron dos modalidades de riego (manual y automático), demostrando que los procesos automatizados generaban mayores ahorros en comparación con los métodos convencionales. Otros experimentos confirmaron que el modelo cumplió con los objetivos planteados y que puede servir como base para su escalabilidad en diferentes contextos.

Lara [13], también en Lima, diseñó e implementó un sistema de control inteligente para gestionar la humedad, temperatura e iluminación en el cultivo de orquídeas. Su investigación experimental utilizó tres muestras de microclima y demostró que el sistema ajustaba de forma automática la temperatura (entre 15 °C y 26 °C) y la humedad relativa (entre 50% y 90%). Se concluyó que el sistema basado en lógica difusa permitió una administración eficiente del agua y de las condiciones ambientales del cultivo.

De la misma forma, Julca y Leyva [14], en Lambayeque, desarrollaron un prototipo de riego automático basado en teorías de control automático, hidrozonas y riego por aspersión y difusión. Su investigación demostró que el sistema permitió ahorrar un 22% de agua, mantener la humedad del

suelo en un 81% y mejorar la uniformidad del riego en un 13%.

Finalmente, Chávez [15], en Huaraz, presentó un prototipo de riego automatizado con tecnología Arduino, utilizando la metodología de *hardware* libre. Mediante encuestas y entrevistas a especialistas, se determinó que el sistema redujo entre un 10% y un 20% el volumen de agua destinado al riego.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Teoría sobre sistemas de control digital

Esta teoría examina el diseño y operación de sistemas de control que procesan señales y ejecutan operaciones de forma discreta, es decir, digital. Se fundamenta en el uso de microcontroladores y algoritmos para gestionar datos, realizar cálculos y ejecutar comandos de manera automática [16]. En la aplicación de un sistema de riego, permite que las señales capturadas por sensores como los niveles de humedad o temperatura, se transformen en acciones específicas, por ejemplo, activar una bomba de riego. Mediante dispositivos como Arduino o Raspberry Pi, el sistema analiza las condiciones del entorno y toma decisiones de forma autónoma. Asimismo, la incorporación de controladores digitales, como el PID (Proporcional–Integral–Derivativo) o la lógica difusa, garantiza una mayor precisión en el suministro de agua [17].

2.2.2 Teoría de la lógica difusa

Formulada por Lotfi A. Zadeh, la lógica difusa plantea que las decisiones no siempre pueden clasificarse como completamente verdaderas o completamente falsas. En su lugar, permite manejar valores intermedios, lo que resulta especialmente útil en sistemas que operan bajo condiciones inciertas o variables, como el riego agrícola [18]. En este contexto, la lógica difusa facilita la toma de decisiones basadas en valores aproximados, como “el suelo está moderadamente seco” o “la temperatura es alta”, en lugar de depender de límites estrictos. Para ello, utiliza conjuntos difusos que interpretan los datos de los sensores y establecen reglas flexibles; por ejemplo: “Si la humedad es baja y la temperatura es alta, regar

durante cinco minutos” [19]. Este enfoque mejora la eficiencia al ajustar el riego de forma gradual y dinámica, adaptándose a las condiciones cambiantes del cultivo. Además, permite procesar datos en términos cualitativos —“bajo”, “moderado” o “alto”—, en vez de depender exclusivamente de valores numéricos exactos. En sistemas con comunicación bidireccional, puede interpretar tanto señales entrantes como salientes, traduciéndolas en recomendaciones claras o acciones específicas. Esto asegura un uso adecuado del recurso hídrico, minimiza desperdicios y optimiza las condiciones del cultivo, favoreciendo decisiones más precisas en tiempo real [19].

2.2.3 Sistema

Según la Organización Internacional de Normalización (ISO), un sistema es una estructura organizada de componentes interconectados, diseñada para alcanzar un objetivo específico dentro de un marco normativo que promueve la eficiencia, la calidad y la mejora continua [20]. La norma ISO 9000 define un sistema como un conjunto de elementos interrelacionados que interactúan para establecer políticas, metas y procesos orientados a alcanzar objetivos [20]. Estos elementos incluyen: Ingresos: datos, información y entradas que acceden al sistema y procesos: transformaciones de las entradas que generan salidas y resultados [21].

Asimismo, un sistema puede considerarse como un conjunto de componentes vinculados, donde cualquier variación en uno de ellos impacta a todo el conjunto. Estos componentes están conectados —de forma directa o indirecta— al problema que se desea resolver. Para analizar un sistema, es esencial comprender tanto los elementos que lo integran como las conexiones entre ellos [22].

2.2.4 Sistema de control inteligente

Un sistema de control inteligente es el resultado de la convergencia entre el control automático, la inteligencia artificial y los modelos informáticos en tiempo real. En estos sistemas, el conocimiento de control proviene de expertos humanos, es decir, de los operadores del proceso controlado [23]. De acuerdo con [24], los sistemas de control

inteligente tienen la capacidad de organizar y ejecutar tareas de forma autónoma, en función de los datos recopilados y procesados. Este tipo de control emplea herramientas de inteligencia artificial y aprendizaje en línea para incrementar la eficacia respecto a los métodos tradicionales.

2.2.5 Comunicación bidireccional

La comunicación bidireccional se refiere a aquella que permite a los usuarios de un sistema de software interactuar a lo largo del funcionamiento del mismo. Esta comunicación es fundamental, ya que representa la interfaz entre la máquina y el ser humano. Por lo tanto, se deben considerar aspectos como:

- El diseño arquitectónico de la información.
- La presentación de datos relevantes al contexto actual.
- La prevención de la sobrecarga de información textual al usuario.
- La correcta generación de mensajes, evitando confusiones.
- La implementación de ventanas específicas para cada módulo de diferentes tipos de información.

La atención al diseño para prevenir errores y asegurar que el mensaje proyectado en la pantalla sea claro [25].

La comunicación se realiza mediante retroalimentación constante, como se observa en la figura 1 [25]. Esto significa que tanto el destinatario como el remitente intercambian mensajes, creando una conversación bidireccional [26].

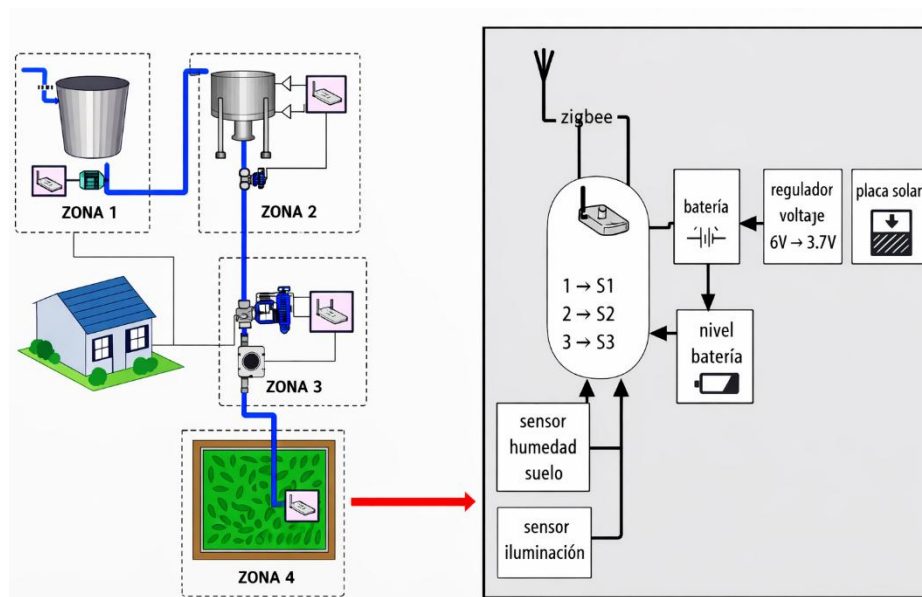


Fig. 1 Comunicación Bidireccional.

Nota. Se muestra ambas partes que establecen la comunicación.

2.2.6 Sistema de riego automatizados

Este tipo de sistema suministra agua a los cultivos de forma automatizada, generalmente mediante riego por goteo o aspersión. Algunos métodos combinan ambas tecnologías, aprovechando las ventajas de cada una. No obstante, al distribuir agua en terrenos agrícolas, pueden presentarse diversas dificultades que provocan pérdidas y dificultan una distribución uniforme. Abordar estos desafíos resulta crucial, especialmente a medida que los recursos hídricos se vuelven cada vez más escasos [27].

La cantidad de riego no depende únicamente del intervalo entre riegos o del tiempo que transcurre entre el consumo de agua y su evaporación por parte de la planta, sino también de las reservas hídricas del suelo y de la capacidad de la planta para extraer agua desde las capas más profundas. Un exceso de riego puede provocar drenaje profundo más allá de la zona radicular, arrastrando fertilizantes y afectando negativamente la salud del cultivo. Además, la tasa de aplicación varía según el método de riego utilizado [28].

2.2.7 Clases de sistemas de riego

a. Riego de superficie o por gravedad: Este método utiliza agua que se aplica a la superficie del terreno y se distribuye por gravedad. La

penetración en el suelo reduce el flujo de riego sobre el área, como se observa en la figura 2 [29].



Fig. 2 Riego por gravedad.
Nota. Obtenido de las técnicas de uso del agua.

b. Riego por aspersión: Este sistema simula la lluvia, es decir, rocía gotas de agua sobre el cultivo. La red de tubos transporta agua hacia los aspersores, los cuales utilizan presión para realizar el riego. La eficacia del riego se incrementa mediante un sistema de bombeo, como se muestra en la figura 3 [30].



Fig. 3 Riego por aspersión
Nota. Obtenido de las técnicas de uso del agua.

c. Riego por goteo: este método aplica agua a través de goteros, generando una zona de humedad en el suelo conocida como “bulbo húmedo”. Dicho bulbo puede alcanzar su diámetro máximo a unos 30 cm de profundidad, dependiendo principalmente de las características y estructura del suelo. Los sistemas de riego por goteo pueden alcanzar eficiencias del 90 % al 95 % en el uso de agua y fertilizantes, frente al 55 % al 60 % de los sistemas por gravedad. Este sistema se ilustra en la Figura 4 [31].



Fig. 4 Riego por goteo
Nota. Obtenido de las técnicas de uso del agua.

2.2.8 Domótica

La domótica permite automatizar acciones relacionadas con la protección, el confort y el bienestar, mediante sistemas inteligentes integrados en diversas actividades [31].

Estos sistemas son fundamentales para optimizar recursos, ya que controlan de manera eficiente aspectos como el clima, la seguridad y la iluminación, contribuyendo al ahorro energético y mejorando el bienestar del usuario, incluso en aplicaciones agrícolas [31].

2.2.9 Automatización

La automatización se refiere al uso de procedimientos y tecnologías que permiten obtener resultados con una mínima intervención

humana. Estas herramientas y softwares se aplican en múltiples ámbitos, desde la contabilidad hasta la atención médica, los servicios públicos y la defensa. Asimismo, son empleadas en distintos sectores empresariales e institucionales para lograr ventajas competitivas significativas [32].

2.2.10 Sistema electrónico

Los sistemas electrónicos son diseños que procesan señales eléctricas. Dichas señales, que inicialmente carecen de energía utilizable, son convertidas mediante una unidad especializada que capta y transforma el estímulo inicial en energía eléctrica. Por ejemplo, al ejercer presión sobre una superficie como una alfombra, se activa un interruptor capaz de transformar ese estímulo físico en una señal eléctrica [33].

2.2.11 Microcontrolador

Un microcontrolador es un componente electrónico que integra un procesador (CPU), memoria (RAM y ROM) y periféricos (puertos de entrada/salida, temporizadores, conversores analógico-digitales, etc.) en un único chip. Este circuito integrado está diseñado para ejecutar funciones específicas de control en sistemas embebidos, como electrodomésticos, vehículos, robots y otras aplicaciones. Se muestra en la Figura 5 [34].

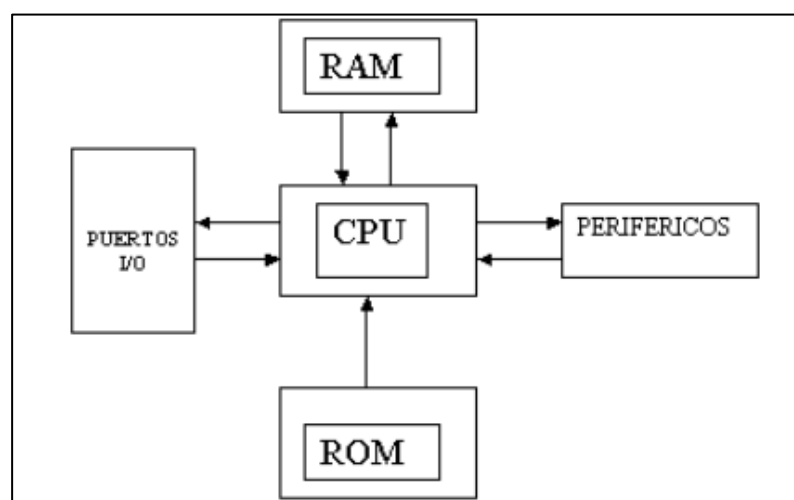


Fig. 5 Microcontrolador

Nota. Obtenido del estudio de conexión directa de múltiples sensores a microcontroladores sin utilizar convertidor analógico digital.

2.2.12 Algoritmo

Un algoritmo es un conjunto estructurado y definido de pasos para realizar una tarea específica. Las instrucciones están organizadas y restringidas a las fases necesarias para alcanzar el objetivo. Todo algoritmo posee entradas y salidas, que pueden ser señales o acciones. Estas fases son sistemáticas y, lo más importante, constan de un número limitado de pasos que conducen a una solución precisa [35].

2.2.13 La administración de riego

La administración de riego es un proceso que promueve el manejo eficiente y sostenible de los recursos hídricos y del suelo, con el fin de optimizar el bienestar de la comunidad y fomentar una economía equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales. Incluye métodos, técnicas y mediciones que permiten usar el agua de forma eficaz, asegurando su calidad [36].

En palabras de Sánchez y Acosta [37], la finalidad de la administración de riego es planificar y gestionar los recursos hídricos de manera responsable. En la agricultura de riego, resulta fundamental aplicar medidas adecuadas en situaciones críticas para lograr un buen rendimiento. La eficacia y eficiencia en el uso del agua son determinantes, ya que más del 70 % del agua utilizada se destina a este propósito. En conclusión, la administración del riego es un proceso de gestión que permite equilibrar el recurso hídrico con su uso, así como asegurar la calidad y cantidad de agua de manera dinámica.

2.2.14 Contenido de humedad relativa del suelo

Se refiere a la proporción de agua almacenada en el suelo en comparación con su capacidad máxima de retención. Generalmente expresada en porcentaje (%), esta variable es clave para el desarrollo óptimo de las plantas, ya que influye en la absorción de nutrientes, la oxigenación de las raíces y la prevención de enfermedades. Mantener un nivel adecuado de humedad permite optimizar el riego y favorecer un crecimiento saludable [38].

2.2.15 Métodos para medir la humedad en el suelo

2.2.16 La medición de la humedad del suelo contribuye a un uso más eficiente del agua en la agricultura. Tradicionalmente, las decisiones de riego se basaban en la experiencia del agricultor, sin recurrir a mediciones objetivas. Actualmente, existen tecnologías que permiten una gestión más sostenible y efectiva de este recurso vital. Los métodos de medición se clasifican en directos e indirectos [39].

A. Método directo

Entre los métodos más empleados tenemos los siguientes:

- **Método del tacto:** Se determina la humedad del suelo mediante la recolección de una muestra profunda. Luego, se oprime la muestra con los dedos hasta que escurra el agua, lo que permite estimar el nivel de humedad. Las estimaciones están detalladas en la Tabla I.

TABLA I. ESTABLECIMIENTO DE LA HUMEDAD DE LA TIERRA POR EL TACTO

Nivel de humedad	Tacto	Humedad (contenido)
Seco	Polvo seco.	Ninguna.
Bajo		< 25%
Medio	Se demuele, pero se aplasta.	25% a 50%
Aceptable	Se forma bola y se aplasta con Presión.	50% a 75%
Excelente	Se forma bola, se aplasta y es moldeable.	75% a 100%
Húmedo	Chorrea agua cuando se oprime.	Sobre capacidad.

Nota. Métodos diferentes para detectar el nivel de humedad [39].

- **Método gravimétrico:** Este procedimiento actúa como un modelo de referencia para comparar otros métodos. Consiste en tomar una muestra de tierra, pesarla y colocarla en un horno a 105° C - 110° C durante 24 horas hasta obtener un peso constante. La fórmula a utilizar es:

$$P_S = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

Donde:

P_s = Porcentaje humedad de un suelo (%).

P_{ss} = Peso de suelo seco (gr.).

P_{sh} = Peso de suelo húmedo (gr.).

B. Método indirecto: Estos métodos son más avanzados y utilizan equipos innovadores que facilitan su aplicación en el campo. Entre ellos destacan:

- **Tensiómetros:** son instrumentos que permiten evaluar la capacidad del suelo para retener y suministrar agua mediante la medición de la tensión o fuerza de succión. Estos dispositivos son particularmente efectivos en suelos con altos niveles de humedad; sin embargo, pierden eficiencia en condiciones de baja humedad o suelos excesivamente secos.
- **Bloques de yeso:** Este procedimiento se basa en la resistencia del suelo, que varía según el porcentaje de humedad. Se utilizan dos electrodos colocados a ambos lados de un trozo de yeso enterrado, conectados a un dispositivo que mide la resistencia en ohmios.
- **Sensores por conductividad:** Funcionan mediante la circulación de una corriente eléctrica a través del suelo; la presencia de agua afecta la conductividad eléctrica, lo que permite medir los niveles de humedad.

2.2.17 Orquídeas temperatura y humedad

El cultivo de orquídeas requiere un cuidado especial y sustratos específicos. Estas plantas necesitan condiciones adecuadas de temperatura y humedad para evitar que se marchiten y mantener su salud óptima. La Tabla II muestra la variación del clima, la temperatura y la humedad [38].

TABLA II. TEMPERATURA Y HUMEDAD PARA EL CULTIVO DE ORQUÍDEAS

Variación del clima	Temperatura	Humedad
Frío	10°C - 12°C	30% - 40%
Medias	12°C - 15°C	40% - 60%
cálidas	15°C - 18°C	60% - 85%

Nota. Variación del clima, temperatura y humedad [38].

2.2.18 Arquitectura IoT por capas

La arquitectura IoT por capas es un enfoque de organización de sistemas que separa funciones en componentes o capas (por ejemplo, sensado, procesamiento, comunicación, servicios y aplicación), con el fin de mejorar la modularidad, interoperabilidad y mantenibilidad del sistema [40], [41], [42]. En sistemas de riego inteligente, este enfoque permite estructurar de forma clara el flujo de información desde la captura de variables del cultivo hasta la decisión de control y la supervisión por parte del usuario, facilitando el diseño y la evaluación del sistema.

2.2.19 Sistema embebido

Un sistema embebido es un sistema computacional integrado en un dispositivo electrónico para ejecutar funciones específicas de control, monitoreo o procesamiento dentro de un sistema mayor. A diferencia de una computadora de propósito general, está orientado a tareas concretas y opera con restricciones de recursos (memoria, energía y procesamiento) [43], [42], [44]. En el contexto de sistemas IoT de riego, el sistema embebido permite ejecutar lógica de control local, procesar señales de sensores y coordinar la actuación sobre el proceso físico.

2.2.20 Computación en el borde (Edge computing)

La computación en el borde (edge computing) es un paradigma en el que el procesamiento de datos se realiza cerca de la fuente donde se generan, en lugar de depender exclusivamente de servicios remotos en la nube. Este enfoque reduce latencia, disminuye tráfico de red y mejora la capacidad de respuesta del sistema [41], [45]. En

aplicaciones de riego inteligente, la computación en el borde favorece la ejecución oportuna de decisiones de control sobre el riego aun cuando existan limitaciones de conectividad.

2.2.21 Modelo cliente–servidor en sistemas IoT

El modelo cliente–servidor es una forma de organización de sistemas distribuidos en la que un cliente solicita datos o servicios y un servidor responde a dichas solicitudes. Este modelo es ampliamente utilizado en IoT para articular el intercambio de información entre dispositivos, servicios remotos y aplicaciones de usuario [46], [47].

Su importancia en sistemas de riego inteligente radica en que proporciona una base conceptual para la comunicación entre el controlador, la infraestructura de datos y la interfaz de supervisión/configuración.

2.2.22 Arquitectura por subsistemas en sistemas de riego automatizado

La arquitectura por subsistemas es un enfoque de diseño que divide un sistema complejo en unidades funcionales interrelacionadas, con el propósito de facilitar su comprensión, implementación y mantenimiento. En sistemas de riego automatizado, esta separación suele distinguir el subsistema de adquisición/control y el subsistema de distribución hidráulica [43], [48].

Este enfoque permite analizar con mayor claridad la relación entre medición, decisión y actuación, así como la ejecución física del riego sobre el cultivo.

2.2.23 Integración hardware–software en sistemas ciberfísicos

La integración hardware–software se refiere a la coordinación funcional entre componentes físicos (sensores, actuadores y elementos del proceso) y componentes lógicos (control, comunicación, servicios y aplicación) para lograr un comportamiento operativo único del sistema [40], [43], [42].

Desde el enfoque de sistemas ciberfísicos, esta integración vincula computación, red y proceso físico, permitiendo que los datos del entorno se transformen en acciones de control y retroalimentación para el usuario [44]. En sistemas de riego inteligente, este fundamento

teórico respalda la articulación entre sensado, decisión de riego, actuación hidráulica y supervisión remota.

2.3 Definición de términos básicos

Agua agrícola: Se refiere al recurso hídrico utilizado para irrigar los cultivos y satisfacer las necesidades hídricas de las plantas en la agricultura. Es fundamental para el crecimiento y la productividad de los cultivos, especialmente en regiones con climas áridos o con escaso período de lluvias.

Application - Specific Integrated Circuit (ASIC): Es un tipo de circuito integrado diseñado para realizar tareas específicas o un conjunto determinado de funciones. A diferencia de los circuitos integrados generales, los ASIC son más eficientes en términos de rendimiento y consumo de energía debido a su diseño específico.

Sistema complejo: Es un grupo de componentes vinculados entre sí que interactúan de forma no lineal, dando lugar a patrones de comportamiento emergentes que no pueden comprenderse solo a partir de la suma de sus partes individuales.

Circuito integrado: Es un conjunto de componentes electrónicos, como transistores, resistencias y condensadores, fabricados en un único chip de semiconductor. Los circuitos integrados permiten la producción de dispositivos electrónicos más compactos, eficientes y económicos.

Comunicación bidireccional: Es una conexión continua en la que, tras recibir un feedback, el receptor y el emisor cambian de roles, estableciendo un diálogo en ambas direcciones.

Cultivo: Es el producto de la labor de cultivo, lo que implica llevar a cabo en el suelo los procesos esenciales para la obtención de alimentos.

Electroválvulas: Son grifos electromecánicos diseñados para regular el flujo de fluidos a través de una línea o conducto. Estos grifos funcionan mediante una bobina magnética.

Memoria ROM: Es un tipo de memoria que permite solo la lectura de datos, los cuales se almacenan de forma permanente, incluso cuando el dispositivo está apagado.

Memoria RAM: Se utiliza para almacenar de manera temporal los datos y programas que el procesador está ejecutando. Al apagarse el sistema, la información almacenada en la RAM se pierde.

Microordenador, es una computadora compacta que utiliza un microprocesador como unidad central de procesamiento (CPU). Es capaz de realizar tareas informáticas básicas y se emplea en diversas aplicaciones, desde dispositivos personales hasta sistemas de control integrados.

Microprocesador: Es el componente principal de un ordenador, un chip que contiene los circuitos y la lógica necesaria para procesar datos. Su función principal es ejecutar instrucciones y realizar operaciones matemáticas o de manipulación de datos.

Orquídeas: Son plantas tropicales del grupo de las monocotiledóneas, caracterizadas por la diversidad y complejidad de sus flores, que son esenciales para su fecundación.

Riego: Es el proceso de proporcionar agua a los cultivos a través del suelo, para compensar la falta de lluvia o aumentar la producción agrícola en áreas áridas.

Sensores: Son instrumentos que detectan y responden a ciertos patrones de datos en el entorno natural.

Sembrío: Se refiere al acto de plantar semillas en la tierra para que germinen y crezcan, así como al terreno donde se realiza esta acción. Esta fase es clave en la agricultura, ya que asegura el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Sistema: Es una unidad compuesta por un grupo de componentes o dispositivos interrelacionados y su conexión con el entorno que los rodea. Esta conexión se expresa explícitamente mediante el lenguaje matemático.

Sistema de control inteligente: Es el resultado de la integración de control automático, inteligencia artificial y modelos computacionales aplicados en tiempo real.

Transformada de Laplace: Es una herramienta matemática que se utiliza para convertir funciones definidas en el dominio temporal en funciones en el dominio de Laplace.

Transformada Z: Es una técnica matemática empleada para el análisis y

diseño de sistemas discretos, particularmente en el procesamiento de señales y en sistemas de control digital.

Unidad de Cribado: Es un dispositivo o sistema que permite identificar y organizar las necesidades específicas de riego de las plantas, considerando factores como la variedad floral, la etapa de crecimiento, la capacidad del sustrato para retener agua y las condiciones ambientales (temperatura, humedad y luz).

Usufructuario: Es la persona que posee el derecho de usar y disfrutar de una propiedad que pertenece a otro, sin ser el propietario.

API REST: enfoque para desarrollar servicios web que se comunican mediante HTTP, utilizando métodos estándar (GET, POST, PUT, PATCH, DELETE) para gestionar recursos a través de URLs. Estos servicios pueden operar en modo no cifrado (HTTP) o seguro (HTTPS), y cada solicitud se procesa de forma independiente sin mantener estado.

REST (Representational State Transfer)

REST es un estilo arquitectónico para el diseño de servicios web que permite la comunicación entre sistemas mediante recursos identificados por URL y operaciones estándar del protocolo HTTP (como GET, POST, PUT y DELETE). Se caracteriza por ser sin estado (stateless), utilizar una interfaz uniforme y facilitar la interoperabilidad entre aplicaciones distribuidas. En términos prácticos, REST permite que un cliente (por ejemplo, una aplicación móvil) consulte, envíe o actualice información en un servidor de manera estructurada y estandarizada.

Xamarin: plataforma que permite desarrollar aplicaciones móviles nativas para iOS, Android y Windows usando C# y .NET. Con ella, se puede escribir una sola base de código que se compila en apps nativas para cada sistema operativo y se integra fácilmente con servicios web y APIs REST.

Controlador difuso: sistema de control que utiliza la lógica difusa para manejar incertidumbres e imprecisiones en los datos. Utiliza funciones de pertenencia y un conjunto de reglas heurísticas para tomar decisiones, permitiendo controlar sistemas complejos similar al razonamiento humano.

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área experimental

Este estudio se desarrolla en la ciudad de Cajamarca, los prototipos se instalaron en un ambiente iluminado, ventilado y protegido de la radiación solar, siendo estas las condiciones adecuadas para el desarrollo saludable de las orquídeas; como se muestra en la figura 6 [49].



Fig. 6 Descripción del área experimental

Nota. Elaboración propia.

3.2 Materiales y dispositivos utilizados en el proyecto

Materiales de campo: Cubeta, Sustrato, Libreta de apuntes, Manguera micro goteo, micro aspersores.

Dispositivos

- Fuente de alimentación para placa
- Módulo de potencia para placa MB - 102
- Microcontrolador Esp32
- Cable USB a Micro USB para conectar Esp32 a un ordenador.
- Sensor capacitivo para humedad de suelo
- Sensor de temperatura DS18B20
- Sensor de humedad relativa y temperatura DHT22
- Electroválvula
- Módulo relé 5v

- Fuentes de alimentación 12v
- Kit de Cables
- Pantalla LCD 128x64 GME 12864-11
- Sensor de flujo de agua YF-S201

3.3 Procedimiento

El desarrollo del prototipo inteligente para la administración del riego comprende las siguientes fases:

3.3.1 Conceptualización de las especificaciones modelo

El modelo de riego inteligente tiene como función principal el suministro de agua al cultivo de orquídeas en el momento y cantidad adecuados, optimizando así el uso del recurso hídrico y conservando el nivel de humedad. Las especificaciones clave del modelo incluyen:

- Monitoreo de sensores de humedad, temperatura y flujo de agua.
- Riego en el momento adecuado
- Riego en función de las necesidades del cultivo
- Riego automatizado
- Fácil uso
- Bajo costo de implementación

3.3.2 Arquitectura de Software

En el presente trabajo, la arquitectura de software se implementó en cuatro bloques funcionales: (i) software embebido en el ESP32 (borde/edge), (ii) capa de comunicación, (iii) servicio de datos en la nube y (iv) aplicación móvil de supervisión y configuración. Esta organización sigue el enfoque de arquitecturas IoT por capas/vistas, que separan procesamiento local, comunicación y servicios de aplicación, e integran sensado, cómputo, comunicación y actuación (véase figura 7) [40], [41].

El software embebido en el ESP32 se implementó como nodo de control en el borde para ejecutar el ciclo operativo del sistema: adquisición de variables del cultivo y del riego, evaluación de reglas de control (lógica difusa), cálculo del tiempo de riego y accionamiento de la electroválvula mediante relé. De este modo, concentra el procesamiento local y la actuación en tiempo real, con conectividad

Wi-Fi integrada adecuada para aplicaciones IoT [50].

La capa de comunicación implementa el intercambio bidireccional de datos bajo un esquema cliente–servidor y comunicación segura, y comprende dos vínculos: (a) ESP32 ↔ nube, para enviar telemetría/estados/eventos de riego y consultar parámetros de configuración; y (b) nube ↔ aplicación móvil, para visualizar variables del sistema y registrar configuraciones del usuario. El intercambio se realiza sobre HTTP/HTTPS con TLS, mediante operaciones de lectura/escritura compatibles con principios REST [46], [47].

Como servicio de datos en la nube, se empleó Firebase Realtime Database, que proporciona almacenamiento estructurado (JSON) y sincronización en tiempo real entre clientes conectados. Esta capa centraliza la telemetría generada por el ESP32 y los parámetros enviados desde la aplicación móvil, permitiendo la comunicación bidireccional del sistema [51].

La aplicación móvil de monitoreo y configuración (Android, desarrollada en Xamarin) se implementó como interfaz humano–sistema para visualizar el estado del riego y registrar ajustes remotos. Funcionalmente, consulta datos en la nube y envía configuraciones que luego son leídas por el controlador embebido, materializando la bidireccionalidad planteada en la investigación [51].

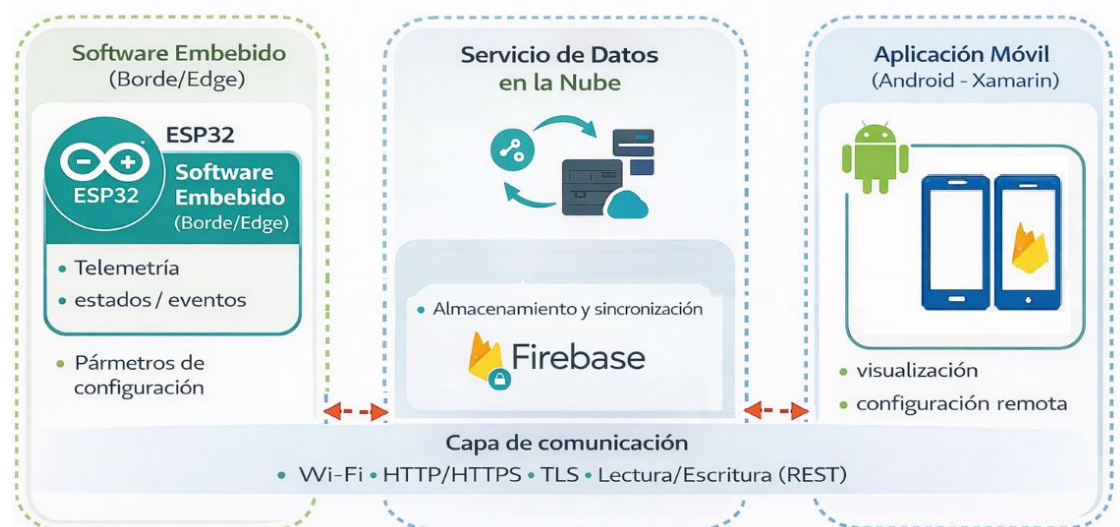


Fig. 7 Arquitectura de software

Nota. Adaptación del estudio de plataformas de enseñanza de microcontroladores e internet de las cosas.

3.3.3 Arquitectura del hardware

La arquitectura del hardware incluye los componentes físicos y eléctricos del sistema de riego en dos subsistemas: (a) electrónico de adquisición y control y (b) hidráulico de distribución de agua, siguiendo una descripción por vistas para mejorar la claridad técnica. El subsistema electrónico integra el ESP32, sensores (humedad del suelo, DS18B20, DHT22, YF-S201), relé, electroválvula y alimentación, permitiendo el lazo de control medición – procesamiento – decisión – actuación, propio de sistemas IoT de riego inteligente [43]. Por su parte, el subsistema hidráulico comprende tanque, tuberías y mecanismos de aplicación de agua (microgoteo o microaspersión), donde la electroválvula activa el flujo y el sensor de flujo cuantifica el volumen suministrado. Su representación debe diferenciar las configuraciones de los prototipos P1, P2 y P3 para asegurar coherencia con la evaluación experimental [48].

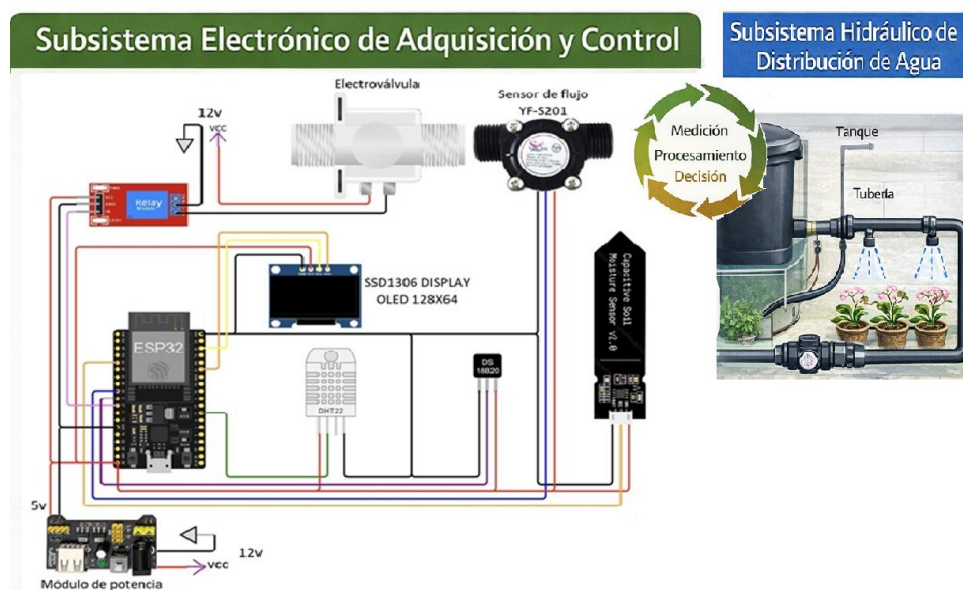


Fig. 8 Arquitectura hardware

Nota. Adaptación de la investigación de un diseño automatizado de riego.

3.3.4 Arquitectura integrada hardware - software

La arquitectura integrada hardware–software describe la interacción funcional entre los subsistemas físicos del riego (electrónico e hidráulico) y los módulos lógicos del sistema (ESP32, comunicación, nube y aplicación móvil), con el propósito de mostrar la

implementación de la comunicación bidireccional y el flujo completo de datos desde el sensado hasta la decisión de riego y la retroalimentación del usuario [40]. Bajo un enfoque de capas IoT, los sensores capturan variables del cultivo, el ESP32 procesa las lecturas y acciona la electroválvula, la nube sincroniza telemetría y parámetros, y la aplicación móvil permite visualizar el estado del sistema y registrar configuraciones remotas que luego son recuperadas por el controlador en el siguiente ciclo de operación [43]. Esta integración evidencia una arquitectura IoT de riego con control en el borde, sincronización de datos y supervisión remota, y fortalece la trazabilidad entre los objetivos de diseño, implementación y evaluación del estudio (como se muestra en la figura 9) [52].



Fig. 9 Arquitectura integrada hardware - software

Nota. Adaptación de la investigación de un diseño automatizado de riego.

3.4 Requerimientos funcionales y no funcionales del sistema y de los componentes del diseño.

Los requerimientos funcionales definen las tareas que el sistema debe ejecutar para alcanzar sus objetivos. Por su parte, los requerimientos no funcionales describen las características que determinan la calidad, el desempeño y las limitaciones bajo las cuales se llevan a cabo dichas tareas, como se muestra en la tabla III [42].

TABLA III. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Y NO FUNCIONALES

Requerimientos Funcionales	Requerimientos No Funcionales
Monitoreo de humedad del suelo: El sistema mide de forma continua el nivel de humedad del suelo usando un sensor capacitivo y activar el riego si el nivel es bajo. Cap. III: (pp. 31, 32). Cap. IV: Fig. 38–40 (pp. 55, 58, 61) y Tablas VI–VIII (pp. 52, 55, 58).	Rendimiento: El sistema debe procesa los datos de los sensores en tiempo real y realizar las acciones necesarias (como activar la válvula) sin retrasos significativos. Cap. III: (pp. 31-33). Cap. IV: métricas de desempeño del sistema por prototipo (Tablas VI–IX, pp. 53–62).
Monitoreo de temperatura ambiental: El sensor de temperatura DHT22 mide y reporta la temperatura del ambiente para asegurar condiciones óptimas para las orquídeas. Cap. III: Fig. 23 (p. 42). Cap. IV: Fig. 38–40 (pp. 55, 58, 61) y Tablas VI–VIII (pp. 53, 56, 60).	Escalabilidad: El sistema es capaz de integrar fácilmente más sensores o actuadores sin requerir una reestructuración significativa del sistema. Cap. IV: comparación explícita entre prototipos con distinto número de macetas y tipo de riego (Tablas VI–IX, pp. 53–62).
Control de riego: El sistema controla la electroválvula para abrirla cuando sea necesario y regar el cultivo. La apertura se basa en las reglas del controlador difuso. Cap. III (pp. 28,29,30). Cap. IV: Tablas VI–VIII (pp. 53, 56, 60).	Fiabilidad: Los componentes son robustos y confiables, minimizando el riesgo de fallos en el sistema, como el mal funcionamiento de la electroválvula o los sensores. Cap. III: Fig. 16 (pp. 33). Cap. IV: métricas de desempeño del sistema por prototipo (Tablas VI–IX, pp. 53–62).
Comunicación bidireccional: El microcontrolador ESP32 permite la comunicación entre el sistema de control y el usuario a través de Wi-Fi. Cap. III: Fig. 13–15 (pp. 30–33) y Fig. 31 (p. 47).	Seguridad: La comunicación bidireccional es segura, garantizando que los datos transmitidos entre el sistema y el usuario estén protegidos mediante cifrado (HTTPS). Cap. III: (p. 33).
Visualización de datos: El sistema muestra en la pantalla LCD los datos relevantes como la humedad del suelo, humedad relativa y la temperatura del suelo en tiempo real. Cap. III: Fig. 26 (p. 43) y Fig. 13–16 (pp. 30–33).	Usabilidad: La interfaz de usuario es intuitiva y fácil de usar, permitiendo una rápida visualización del estado del sistema y ajustes de parámetros de manera sencilla. Cap. III: Fig. 13–16 (pp. 30–33).
Monitoreo del flujo de agua: El sensor de flujo YF-S201 mide el caudal de agua en cada sesión de riego y se almacenan esta información. Cap. III: Fig. 27 (p. 44) y Fig. 16 (p. 33). Cap. IV: Tablas VI–IX (pp. 53–62).	Mantenibilidad: El sistema es fácil de mantener y reparar. Los componentes son accesibles para la sustitución o reparación, su configuración es simple. Cap. III: (pp. 27–29, 33).

Nota. Requerimiento funcional y no funcional del sistema y dispositivos [42].

3.5 Metodología de diseño e implementación del sistema inteligente.

La metodología empleada para el diseño e implementación del sistema inteligente se basa en la Design Science Research Methodology (DSRM), adaptada al contexto de un sistema IoT de riego con comunicación bidireccional. Su adopción se justifica porque la investigación se orienta a la construcción, demostración y evaluación de un artefacto tecnológico (sistema de control inteligente de riego), más que a la sola descripción del

fenómeno [53] , [54].

La DSRM ofrece un proceso estructurado para investigaciones de diseño de artefactos y comprende seis actividades: identificación del problema, definición de objetivos, diseño y desarrollo, demostración, evaluación y comunicación [54]]. Este enfoque resulta coherente con la naturaleza aplicada de la tesis y con la secuencia metodológica desarrollada en los Capítulos III y IV.

En esta investigación, la DSRM se operacionaliza de la siguiente manera: (1) se identifica la necesidad de determinar la influencia de la implementación del riego inteligentes en administración del riego en orquídeas para mantener la humedad de sustrato en rango adecuado; (2) se establecen los objetivos y requerimientos del sistema; (3) se desarrollan la arquitectura de software, la arquitectura de hardware, su integración, el firmware de control, la lógica difusa y la aplicación móvil; (4) se demuestra el funcionamiento mediante la implementación en los prototipos experimentales P1, P2 y P3; (5) se evalúa el desempeño mediante métricas técnicas, consumo hídrico, comportamiento de humedad y variables del cultivo con análisis estadístico descriptivo e inferencial; y (6) se comunican el diseño, los resultados y la discusión en el presente estudio [53], [54].

3.6 Metodología del mejoramiento de sistemas

La metodología de mejoramiento de sistemas se entiende como un conjunto de métodos estructurados orientados a modernizar y optimizar procesos, estructuras o sistemas. Este objetivo se alcanza mediante la incorporación de tecnologías avanzadas, técnicas analíticas y estrategias de control, con la finalidad de lograr mayores niveles de eficacia y eficiencia. Esta metodología abarca tanto los aspectos técnicos como los sociales, aplicando una perspectiva integral para abordar problemas complejos dentro de un sistema específico [55].

El sistema propuesto incorpora sensores para medir parámetros como la humedad del suelo, actuadores para regular el riego y un mecanismo de comunicación bidireccional que permite tomar decisiones en tiempo real. La información recolectada es procesada mediante algoritmos que determinan el momento y la duración óptimos para la apertura de la electroválvula y la ejecución del riego. El diseño considera tanto los

requerimientos técnicos como la integración de hardware y software, además de adaptarse a las características particulares del cultivo.

A continuación, se detallan los pasos para el diseño del sistema:

- Diseño de flujo de control de las electroválvulas
- Subsistema de sensores
- Selección del tipo de comunicación
- Interacción del usuario con el sistema
- Interfaz de sensores
- Interfaz de lecturas grabadas
- Interfaz de gráficas

3.6.1 Diagrama de flujo del control de electroválvula

En la Figura 10, el usuario establece el umbral mínimo de humedad del sustrato y el tiempo de riego; cuando estos parámetros se modifican, el sistema recalcula los conjuntos difusos y, a partir de la difusificación, define la activación o desactivación de la electroválvula.

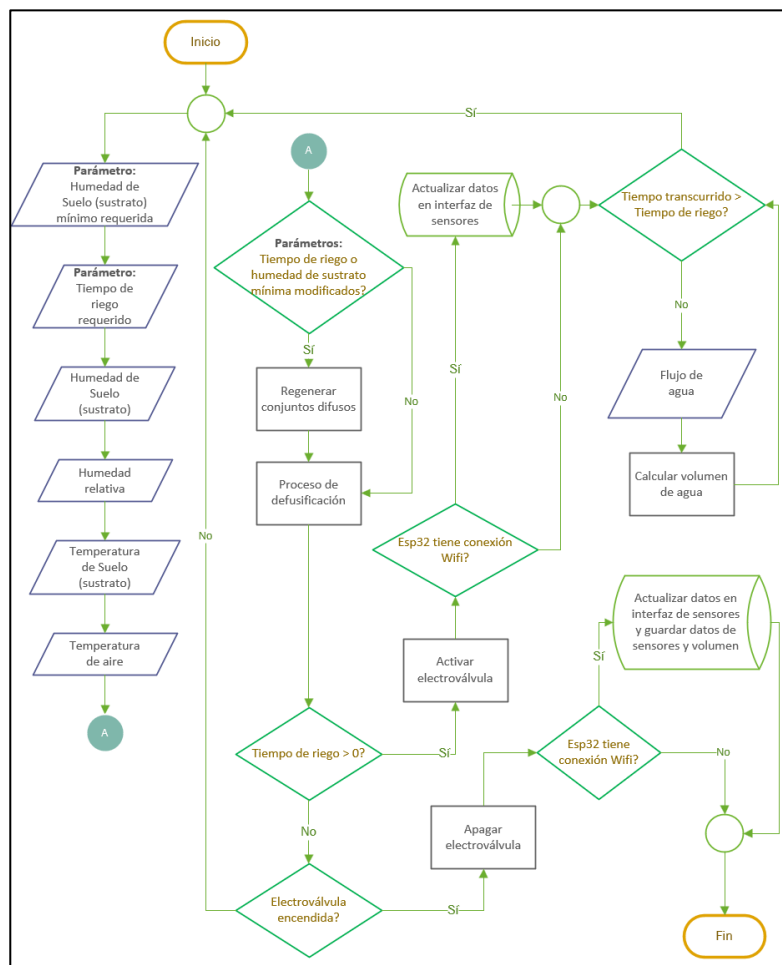


Fig. 10 diagrama de flujo de control de electroválvula.

3.6.2 Subsistema de sensores

Este subsistema permite detectar diversas condiciones en el entorno, captando información de manera autónoma, sin intervención humana. Recoge datos de los sensores de humedad relativa, humedad de suelo temperatura del suelo y temperatura del aire, y traduce esta información a la electroválvula y al sensor de flujo de agua, como se muestra en la figura 11 [56].

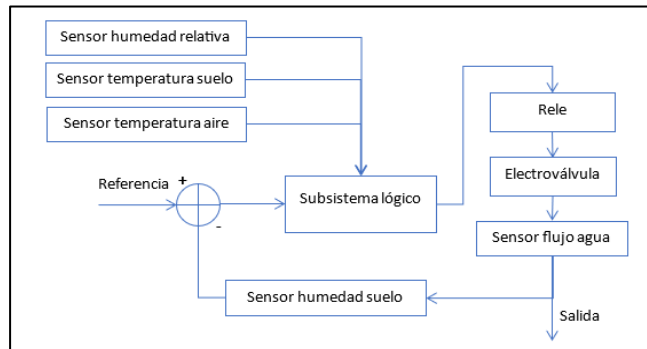


Fig. 11 Diagrama del subsistema de sensores

3.6.3 Subsistema de lógico y control

Este subsistema se activa al iniciar el sistema y es controlado por el operador a través de un dispositivo tecnológico. Su función principal es recibir los datos del sensor de humedad relativa, junto con el tiempo de encendido definido por el usuario. Estas entradas son procesadas por un controlador lógico difuso, el cual genera una respuesta adaptativa en función de las condiciones detectadas. La respuesta obtenida se envía al proceso, mientras que el sensor de humedad del suelo proporciona retroalimentación continua, garantizando así una regulación eficiente del sistema. Ver figura 12 [57].

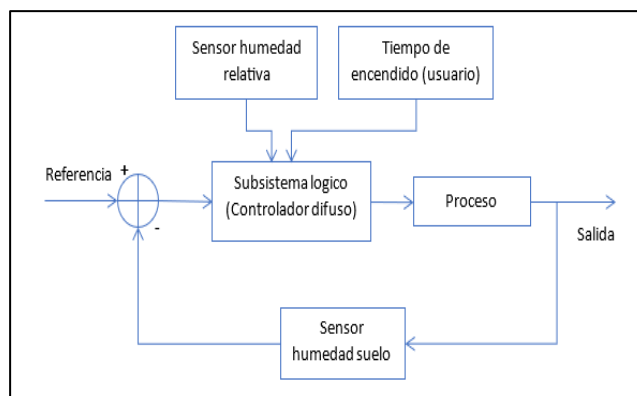


Fig. 12 Diagrama del subsistema de lógico

3.6.4 Selección del tipo de comunicación

En la presente investigación se ha utilizado conexión a internet mediante Wi-Fi 2.4GHz a través del protocolo HTTPS para la comunicación entre el microcontrolador ESP32 y Realtime Database de Firebase. El dispositivo que hace uso de la aplicación desarrollada en xamarin para Android, utiliza conexión a internet de cualquier tipo para conectarse a Realtime Database mediante REST sobre HTTPS y token de autenticación.

3.6.5 Interacción del usuario con sistema

El usuario puede observar y revisar la información accediendo a la aplicación desarrollada en xamarin para Android, cuya información se extraerá de la base de datos correspondiente. Como se muestra en la figura 13, el usuario debe autenticarse con correo y contraseña para ingresar a la aplicación y poder utilizarla [58].

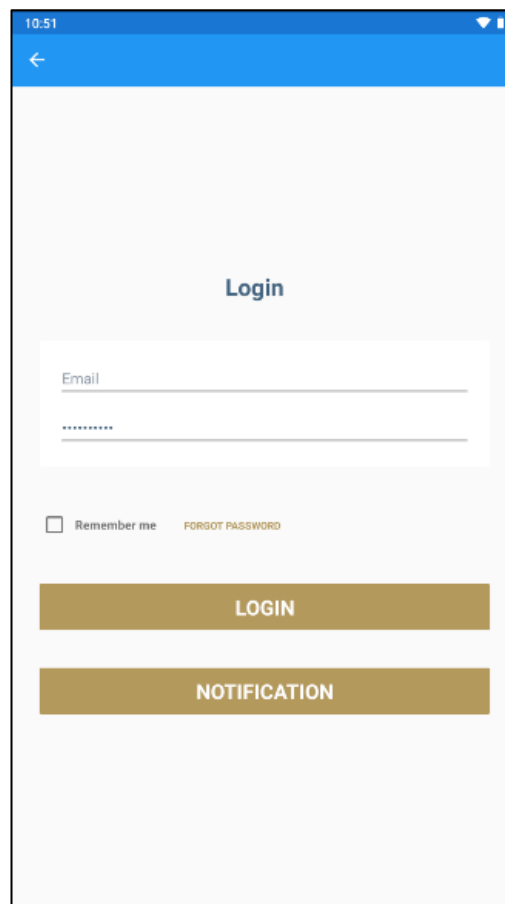


Fig. 13 Interfaz de inicio del aplicativo

3.6.6 Interfaz de sensores

En esta sección se muestra la pantalla de supervisión, donde se visualizan los valores de humedad del sustrato, humedad relativa, temperatura del sustrato y temperatura ambiental, los cuales se actualizan aproximadamente cada 8 segundos. Asimismo, se gestionan los parámetros de configuración, como el tiempo de encendido (Time ON), la humedad mínima del sustrato (Min. Soil) y el intervalo para registrar las lecturas de los sensores en la base de datos (Save New). Esta interfaz permite administrar los parámetros de entrada del controlador difuso, encargado de determinar el tiempo de encendido de la electroválvula. En la Figura 14 se presentan las lecturas de los sensores y la ventana de edición de los parámetros de configuración del riego [59].

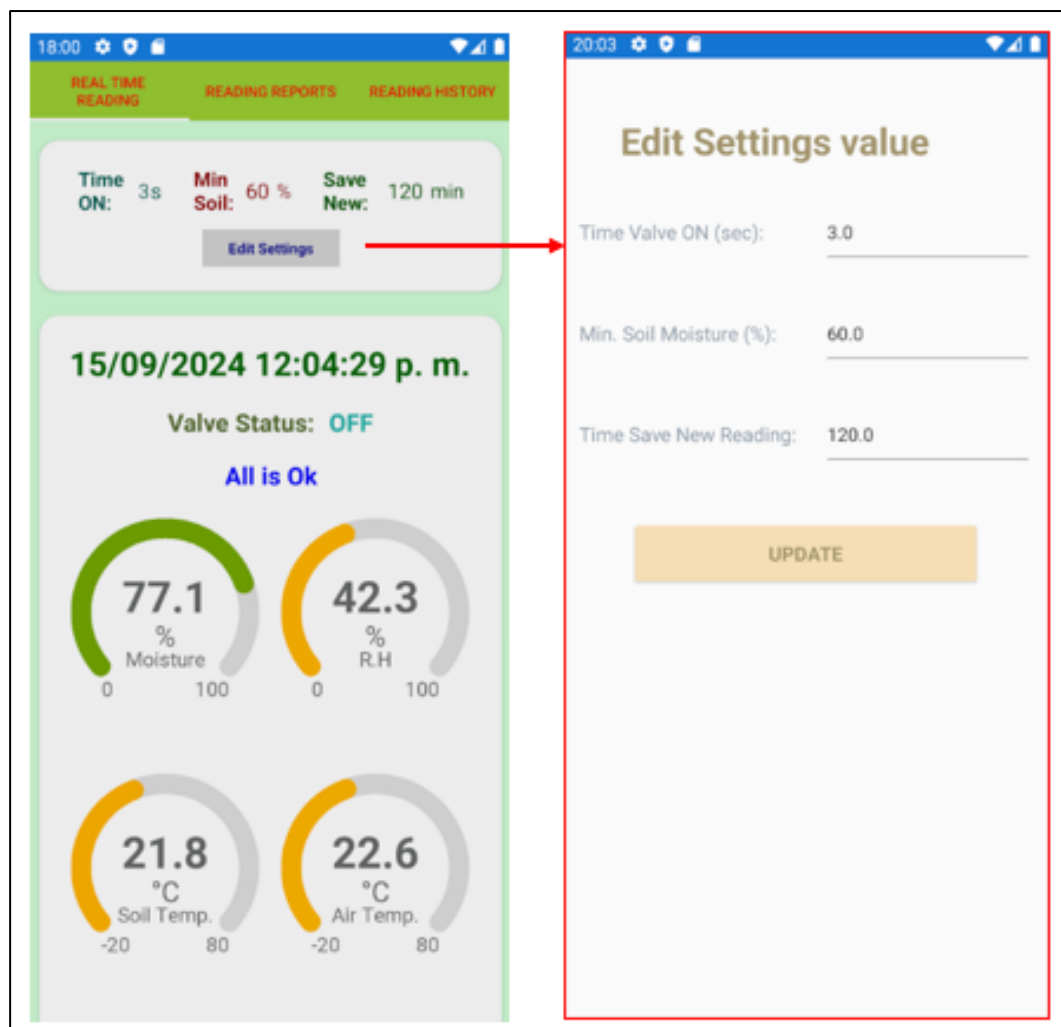


Fig. 14 Interfaz de sensores y edición de parámetros de riego

3.6.7 Interfaz de lecturas grabadas

En esta pantalla se muestran las lecturas almacenadas de los sensores principales que son entradas del modelo difuso, así como el tiempo de riego (tiempo de apertura de la electroválvula) y el volumen de agua suministrado en el tiempo de encendido; las cuales se pueden filtrar por estado de la válvula (ON, OFF) o mensaje de estado de funcionamiento y en un rango de fechas específico, mostrando en la parte superior derecha el volumen de agua acumulado en el rango de fechas seleccionadas y el botón de exportar en csv. Véase figura 15 [60].

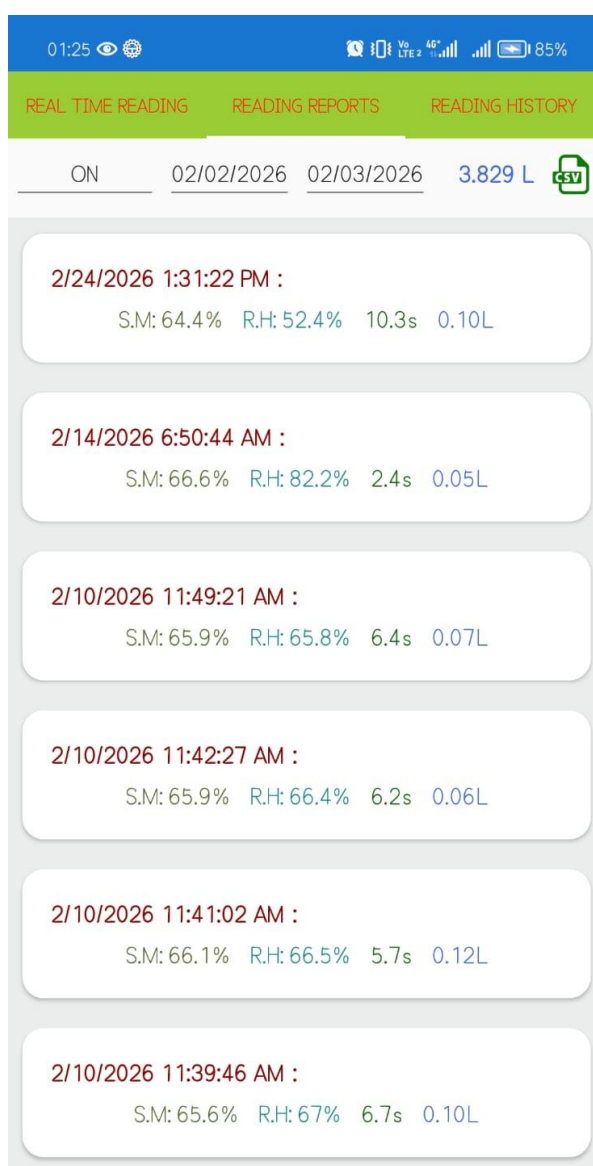


Fig. 15 Interfaz de lecturas grabadas

3.6.8 Interfaz de gráficas

En la figura 16, se presenta la interfaz con dos gráficos que muestran las lecturas de los sensores. La primera gráfica representa la humedad del sustrato y la humedad relativa en función del tiempo, mientras que la segunda muestra las temperaturas del sustrato y del aire. Además, se pueden filtrar las lecturas según intervalo de fechas [61].

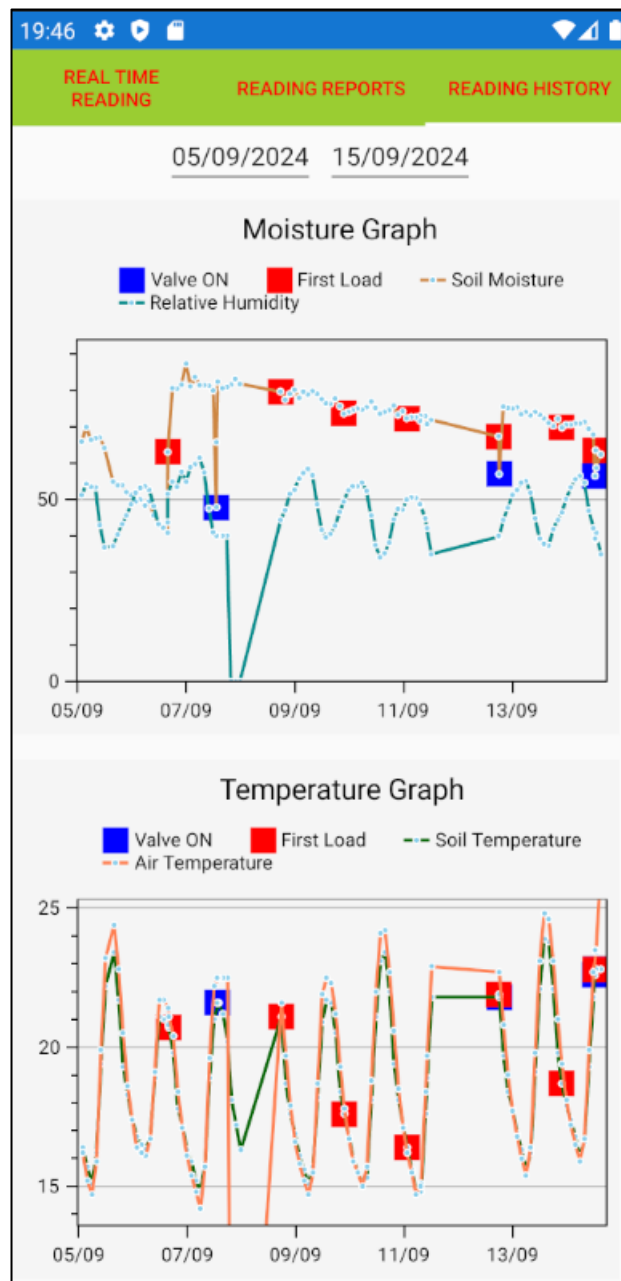


Fig. 16 Interfaz de gráficas

3.7 Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados

3.7.1 Tratamiento

El estudio corresponde a una **investigación aplicada**, en el campo de la ingeniería, orientada a resolver un problema práctico mediante una solución tecnológica [62]. Presenta un **enfoque cuantitativo**, ya que se midieron variables mediante instrumentación y observación, registrando humedad del suelo, temperatura del aire y del suelo, humedad relativa, duración del riego y volumen de agua, para luego analizarlas con estadística descriptiva e inferencial [63].

Su **alcance es explicativo**, porque busca determinar la influencia de la implementación del sistema inteligente en la administración del riego de orquídeas, analizando variables como humedad de sustrato, tiempo de riego y volumen de agua. Se empleó un **diseño experimental** de tipo **cuasi experimental comparativo**, al aplicar una intervención tecnológica y comparar prototipos con distintas configuraciones sin asignación aleatoria, evaluando diferencias en humedad, tiempo de riego y consumo de agua [64]. Asimismo, el estudio presenta **corte longitudinal**, debido a que se realizaron mediciones periódicas a lo largo de todo el periodo de evaluación [65].

La población de estudio se define como el conjunto total de elementos que se investigan [66]. En este caso, estuvo compuesta por tres sistemas de riego aplicado a tres cultivos de orquídeas, una orquídea por maceta: el primero, con 2 macetas y 2 orquídeas, el segundo, con 20 macetas y 20 orquídeas y el tercero 10 macetas y 10 orquídeas.

La muestra estuvo formada por la aplicación del prototipo del sistema de control inteligente a cultivos de orquídeas, compuestos por 2, 10 y 20 macetas. Estos fueron seleccionados mediante un muestreo no probabilístico intencional, el cual se basa en los criterios establecidos por el investigador para muestras pequeñas y específicas [66].

La unidad de análisis corresponde al objeto de estudio del cual se obtienen los datos para el análisis [67]. En este estudio, la unidad de análisis fue cada uno de los prototipos implementados para medir y controlar parámetros clave, como la humedad, temperatura y volumen

de agua en el cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca.

Independiente: Sistema de control inteligente con comunicación bidireccional. Sistema de control de lazo cerrado que recibe información de sensores, procesa datos y actúa de manera automática sobre el riego, permitiendo la interacción bidireccional con el usuario para la supervisión y ajuste de parámetros en tiempo real [68].

Dependiente: Administración del riego de un cultivo de orquídeas. Capacidad de suministrar el recurso hídrico de manera eficiente, manteniendo la humedad de sustrato en condiciones adecuadas que favorezca al desarrollo saludable del cultivo [69].

TABLA IV. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTOS	METODOLOGÍA
<i>Independiente</i> Sistema de control inteligente con comunicación bidireccional	Sistema de control de lazo cerrado que recibe información de sensores, procesa datos y actúa de manera automática sobre el riego, permitiendo la interacción bidireccional con el usuario para la supervisión y ajuste de parámetros en tiempo real [70]	Se implementó un sistema de riego inteligente basado en Esp32, integrando sensores de humedad de sustrato, temperatura de ambiente, humedad relativa, y flujo de agua, con comunicación bidireccional para la visualización de datos y ajuste de parámetros de riego.	Comunicación bidireccional	- Capacidad de intercambio bidireccional exitosa entre aplicación móvil y sistema de control (lecturas enviadas desde el sistema y parámetros recibidos desde la aplicación). Cap. III: Fig. 13–15 (pp. 30–32) - Fluidez de la comunicación entre sistema y usuario (actualización de datos de 6 a 10 segundos). Cap. III: (p. 30,31). - Capacidad de supervisión y corrección del funcionamiento del sistema ante posibles fallas. Cap. IV: Tablas VI–IX, pp. 53–62	- Registros temporales - Observación directa - Inspección técnica	- Investigación aplicada. - Enfoque cuantitativo - Alcance explicativo. - Diseño experimental - cuasi experimental comparativo.
			Adaptabilidad del sistema	- Capacidad de ajuste de parámetros de usuario (tiempo de riego y humedad de sustrato) según condiciones del cultivo (0.3 a 0.7 segundos). Cap. III: (p. 31). - Respuesta del sistema ante variaciones de las variables de entrada (1 a 11 segundos recálculo valores). Cap. III: Fig.10 -12 (pp. 28, 29).	- Registros temporales. - Inspección técnica	
			Estabilidad operativa	- Estabilidad operativa del sistema de control inteligente durante funcionamiento continuo. Cap. III: (p. 30). - Porcentaje de autonomía del sistema (%). - Tasa de error en el funcionamiento del sistema (%). Cap. IV: Tablas VI– IX (pp. 53-62).	- Registros temporales - Inspección técnica	
<i>Dependiente</i> Administración del riego de un cultivo de orquídeas	Capacidad de suministrar el recurso hídrico de manera eficiente, manteniendo la humedad de sustrato en condiciones adecuadas que favorezca al desarrollo saludable del cultivo [21].	Se realizó la medición y comparación de variables cuantitativas asociadas al riego y la humedad del sustrato en tres prototipos implementados (P1, P2 y P3), durante un periodo experimental de seis meses	Regulación de la humedad del sustrato	- Humedad promedio del sustrato (%) - Humedad fuera del rango óptimo (<60% y >80%). Cap. IV: Tablas VI– IX (pp. 53-62).	Registros instrumentales (Sensor de humedad)	- Estadística descriptiva e inferencial, prueba Friedman (χ^2) - Muestra: tres cultivos de orquídeas de la ciudad de Cajamarca.
			Consumo de agua	- Consumo total de agua por prototipo (L). - Consumo medio de agua por maceta (L). Cap. IV: Tablas VI– IX (pp. 53-62).	Registros temporales (Sensor de flujo de agua)	
			Tiempo de riego	- Duración promedio de los eventos de riego (seg.) - Frecuencia de activación del riego (pulsos). Cap. IV: Tablas VI– IX (pp. 53-62).	Registros temporales	
			Desarrollo y crecimiento de las Orquídeas	- Crecimiento medio de tallo de orquídea (cm). - Crecimiento medio de vara floral de orquídea (cm) - Cantidad media de hojas por orquídea. - Condición de las hojas de orquídea (escala de 1 a 4) - Condición de la raíz de orquídea (escala de 1 a 4).	- Observación directa - Inspección técnica	

Técnicas e instrumentos de recolección de información

El proceso de recolección de información se desarrolló delimitando el contexto a observar, identificando la variable de estudio, seleccionando la técnica e instrumento pertinentes y luego aplicarlos para obtener los datos del entorno analizado. Entre las técnicas de recolección de información utilizadas en la presente investigación se tiene a la observación directa [71], la cual se utilizó durante el seguimiento del cultivo para evaluar el estado de hojas, raíces y salud general de las orquídeas, registrándose cada categoría observada mediante la ficha de cotejo (véase Anexo 4). La observación instrumentada [72] se empleó para registrar de forma automática y periódica las variables ambientales y operativas del riego como: humedad del suelo, humedad relativa, temperatura del ambiente y del suelo, duración del riego y volumen suministrado, consignándose dichas lecturas en la ficha de registros temporales (véase Anexo 3). Asimismo, la inspección técnica [73] se aplicó para verificar el funcionamiento del sistema de control inteligente bidireccional mediante evaluación de expertos, utilizando la ficha de inspección (véase Anexo 2) y su validación [74] (véase Anexo 5).

Los instrumentos utilizados para la independiente (Sistema de control inteligente bidireccional) se verificó mediante ficha de inspección (Anexo 2), mientras que la dependiente (Administración del riego de un cultivo de orquídeas) se midió mediante observación directa e instrumentada utilizando los instrumentos de ficha de registros temporales (Anexo 3) y ficha de cotejo (Anexo 4).

En el proceso de análisis e interpretación de datos, se realizó un análisis descriptivo e interpretativo para datos cuantitativos el mismo que respondió a la pregunta de investigación, objetivos, diseño de la investigación y técnica de producción de datos coherente; destacando los procesos de análisis, codificación y categorización. Después se presentó el procesamiento de datos hasta llegar a la formación de categorías y empezar con una presentación general de los resultados

obtenidos, que facilitó su comprensión, luego se desarrolló de manera exhaustiva los resultados, los cuales se presentaron en categorías o conceptos emergentes obtenidos del análisis de datos, dicha presentación incluyeron tanto las interpretaciones del investigador como los datos que sustentan dichas interpretaciones; los resultados del estudio fueron ligados a la naturaleza de la variable, lo que determinó la forma en que se recolecta información [75].

3.7.2 Análisis de datos

Por la naturaleza de los datos se utilizó la estadística descriptiva. De acuerdo con Cuauhtémoc [76], la estadística descriptiva permite sintetizar datos para realizar cálculos y extrapolaciones a poblaciones de referencia, y ajustar la información para tener en cuenta los efectos de los elementos de investigación. Asimismo, permite elaborar cuadros, gráficos y tablas que ayudan a una mejor comprensión y el análisis de la información. De igual manera, se empleó la estadística inferencial para analizar los datos de la muestra y hacer generalizaciones o predicciones, a través de la estadística para normalización por maceta y luego utilizar la prueba de Friedman, Nemenyi, HL, rank-biserial.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del objetivo específico 1: Identificar los componentes tecnológicos adecuados a utilizar en el sistema inteligente

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos tras un análisis detallado de las características, funciones y compatibilidad de los componentes elegidos para integrar el sistema.

a. Módulo de potencia para placa MB-102

El módulo de potencia para placa MB-102 fue seleccionado debido a su capacidad de suministrar voltajes de 3.3V y 5V de manera simultánea, lo que facilita la conexión y alimentación de sensores y actuadores que operan con diferentes niveles de voltaje. La placa MB-102 es ideal para realizar pruebas de circuitos por su facilidad para conectar diversos dispositivos electrónicos, véase figura 17.

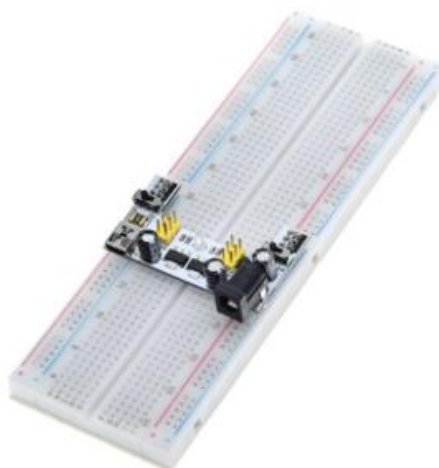


Fig. 17 Módulo de potencia conectado a Placa MB – 102

b. Fuente de alimentación 12 v

En la figura 18, se muestra la fuente sirvió para alimentar de fluido eléctrico a todos los componentes del circuito.



Fig. 18 Fuente de alimentación 12v

c. Microcontrolador ESP32

Este microcontrolador es el núcleo del sistema, destacándose por su capacidad de comunicación Wi-Fi y Bluetooth, así como por su compatibilidad con múltiples sensores. Su elevado poder de procesamiento permite integrar algoritmos para la automatización del riego. Después de evaluar varios modelos, se ha seleccionado el modelo ESP32 ESP-WROOM-32 CP2102 de 38 pines con conector Tipo-C para la implementación del sistema, el mismo que se muestra en la figura 19.



Fig. 19 ESP32 ESP-WROOM-32 CP2102 38 pines Tipo-C

d. Cable USB a tipo C

Se incorporó un cable USB a tipo C para facilitar la conexión del ESP32 al ordenador, permitiendo tanto la programación como la alimentación directa durante las pruebas iniciales, véase figura 20.

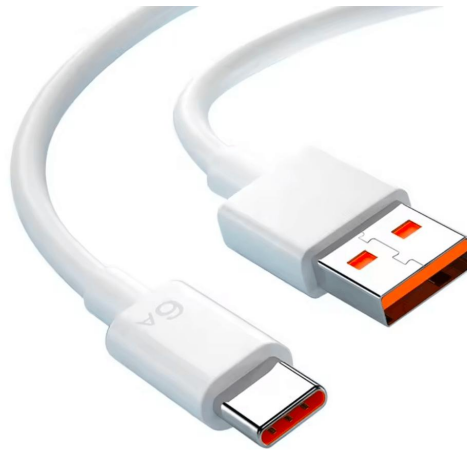


Fig. 20 Figura Cable USB a tipo C

e. Sensor capacitivo para humedad de suelo

En la figura 21 se observa este sensor, el cual fue seleccionado por su alta sensibilidad y capacidad de medir la humedad del suelo sin deteriorarse por el contacto directo con el agua, lo que mejora su durabilidad a largo plazo.



Fig. 21 Sensor de Humedad de suelo Capacitivo

f. Sensor de temperatura DS18B20

El sensor DS18B20 proporciona mediciones precisas de temperatura en un amplio rango, lo que facilita la monitorización de las condiciones ambientales del cultivo con alta fiabilidad, el cual se presenta en la figura 22.



Fig. 22 DS18B20 Kit de módulo de sensor de temperatura con sonda de acero inoxidable impermeable.

g. Sensor de humedad relativa y temperatura DHT22

El DHT22 combina la medición de humedad relativa y temperatura en un solo dispositivo. Su alta precisión y facilidad de integración lo hacen ideal para controlar el microclima del cultivo, véase figura 23.

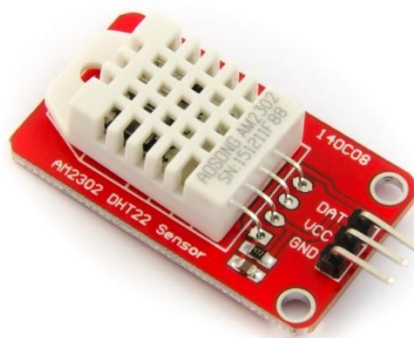


Fig. 23 Sensor de humedad relativa y temperatura DHT 22

h. Electroválvula solenoide ½ 12v

La electroválvula seleccionada, normalmente, está cerrada; es decir, cuando se aplica 12v de corriente continua (DC) a los dos terminales, la válvula se abre y el agua puede fluir. La válvula tiene una disposición de junta interior, por lo que se requiere una presión mínima de 0,02 MPa (3 PSI). Además, el líquido puede fluir sólo en una dirección, lo cual permite un control eficiente del flujo de agua hacia los aspersores y su activación mediante el módulo relé garantiza una operación automatizada y confiable, véase figura 24.



Fig. 24 Electroválvula solenoide 1/2" 12v, normalmente cerrada.

i. Módulo relé 5V

El módulo relé que se muestra en la figura 25 actuó como intermediario entre el microcontrolador y la electroválvula, permitiendo que el ESP32, que funciona con 3.3v controle dispositivos de mayor potencia sin riesgo de daño, en la presente investigación controla a la electroválvula que funciona a 12v.



Fig. 25 Módulo relé 5V

j. Pantalla LCD 128x64 GME 12864-11

Esta pantalla permitió visualizar en tiempo real los datos obtenidos por los sensores, brindando al usuario información crucial sobre las condiciones del cultivo, véase figura 26.



Fig. 26 Pantalla LCD 128x64 GME 12864-11

k. Sensor de flujo de agua YF-S201

El sensor de flujo YF-S201 mide el caudal de agua que fluye al encender la electroválvula, permitiendo medir el volumen de agua en cada sesión de riego, véase figura 27.



Fig. 27 Sensor de flujo de agua YF-S201

l. Micro Aspersores

En la figura 28 se observan los aspersores seleccionados que garantizan una distribución uniforme del agua en el cultivo, optimizando la hidratación de las orquídeas y minimizando el riesgo de saturación en algunas áreas.



Fig. 28 Micro Aspersores

m. Manguera micro porosa

La manguera micro porosa que se muestra en la figura 29, es adecuada para el riego agrícola de jardines, huertos, césped, granjas, etc. Ideal para el riego de orquídeas.



Fig. 29 Manguera micro porosa - riego micro goteo

n. **Cable UTP Categoría 6.**

Se utilizó un cable UTP de Categoría 6 (véase figura 30) para conectar los sensores al microcontrolador ESP32, ya que los sensores se encuentran a una distancia de aproximadamente 6 metros de la fuente de alimentación y el ESP32, lo que permite proteger estos componentes.

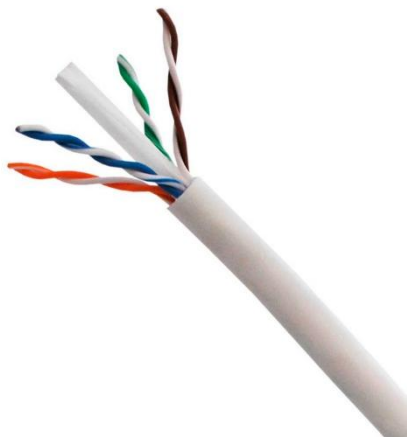


Fig. 30 Cable UTP Categoría 6

4.2 Resultados del objetivo específico 2: Realizar el diseño apropiado para el desarrollo del sistema inteligente.

Con el fin de establecer un diseño adecuado, se definió una arquitectura que combina hardware y software para permitir una comunicación bidireccional eficiente y un control inteligente del riego. Los elementos principales del diseño:

A. Diseño de arquitectura

El diseño del software se centra en coordinar la interacción entre sensores, actuadores y el usuario final. Sus componentes principales son: (i) software embebido en el ESP32 (borde/edge), (ii) capa de comunicación, (iii) servicio de datos en la nube y (iv) aplicación móvil de supervisión y configuración, véase la sección 3.3.2 Arquitectura del Software. El diseño del hardware está orientado a recopilar datos en tiempo real y gestionar los elementos del sistema de riego de manera eficaz, incluye dos subsistemas: (a) electrónico de adquisición y control y (b) hidráulico de distribución de agua, los cuales se definen en la sección 3.3.3 Arquitectura del hardware. La arquitectura integrada se verifica en la sección 3.3.4 Arquitectura integrada hardware – software.

B. Pruebas del prototipo

Programación del microcontrolador (Esp32) se ha realizado en IDE Arduino

El código en la figura 31, corresponde al sistema basado en ESP32 que gestiona la conexión WiFi, la interacción con Realtime Database y la validación de lectura de sensores. En cada iteración del bucle principal (loop), verifica si el token de Firebase ha expirado y lo actualiza si es necesario. Luego, valida la conexión WiFi y, realiza la lectura de sensores y muestra la información en la pantalla LCD. En caso de fallo de conexión, implementa una lógica de reconexión periódica. Además, permite la actualización de configuraciones relacionadas con el tiempo de riego mediante lógica difusa y realiza un reinicio automático cada 24 horas para garantizar estabilidad en la operación.

```

354 void loop() {
355   delay(1500);
356   if (Firebase.isTokenExpired()) {
357     Firebase.refreshToken(&config);
358     Serial.println("Refresh token");
359   }
360   CleanLineScreenSetCursor(24); // startX, startY, width, height, SSD1306_BLACK
361
362   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
363     Serial.println("Wifi Connected successful");
364     lcd.println("Wifi ok");
365     // If (!Firebase.ready())
366     //   ConnectingFirebase();
367     if (isLocalExecute) {
368       resetEsp32();
369     }
370     ProcessValidateReadingSensors();
371     ProcessAutowateringWifi(false, "");
372   } else {
373     Serial.println("ERROR : NO Wifi Connected");
374     lcd.println("NO Wifi");
375     CleanLineScreenSetCursor(16); // startX, startY, width, height, SSD1306_BLACK
376     // lcd.println("::");
377     ProcessValidateReadingSensors();
378     isLocalExecute = true;
379     if ((millis() - currentTimeWifiReconnection > timeWifiReconnection * 60000.0 * 0.95)) { // 1h=3600000 ms | 2min=120000ms
380       currentTimeWifiReconnection = millis();
381       initWifi();
382     }
383   }
384
385   lcd.display();
386   ShowScreenMoistureTemperature();
387   CleanLineScreenSetCursor(40); // startX, startY, width, height, SSD1306_BLACK
388   lcd.println(messageStatus);
389   lcd.display();
390
391   if (isUpdateSettings) {
392     Serial.println("====>>>>>>> isUpdateSettings=true <=> updateSoilMoistureTimeValveFuzzySet()");
393     updateSoilMoistureTimeValveFuzzySet();
394     isUpdateSettings = false;
395   }
396   // ***** Reset daily *****
397   if (millis() > 86400000) { //Reset daily: 86400000ms=1day
398     resetEsp32();
399   }
400   // ***** Reset daily *****
401   delay(1500);
402   // *****
403 }
404 float GetTimeWifiReconnection() {
405   return timeSaveNewReading * 0.95;
406 }

```

Fig. 31 Prueba lógica de conexión Wifi y control de sensores en ESP 32 en IDE Arduino.

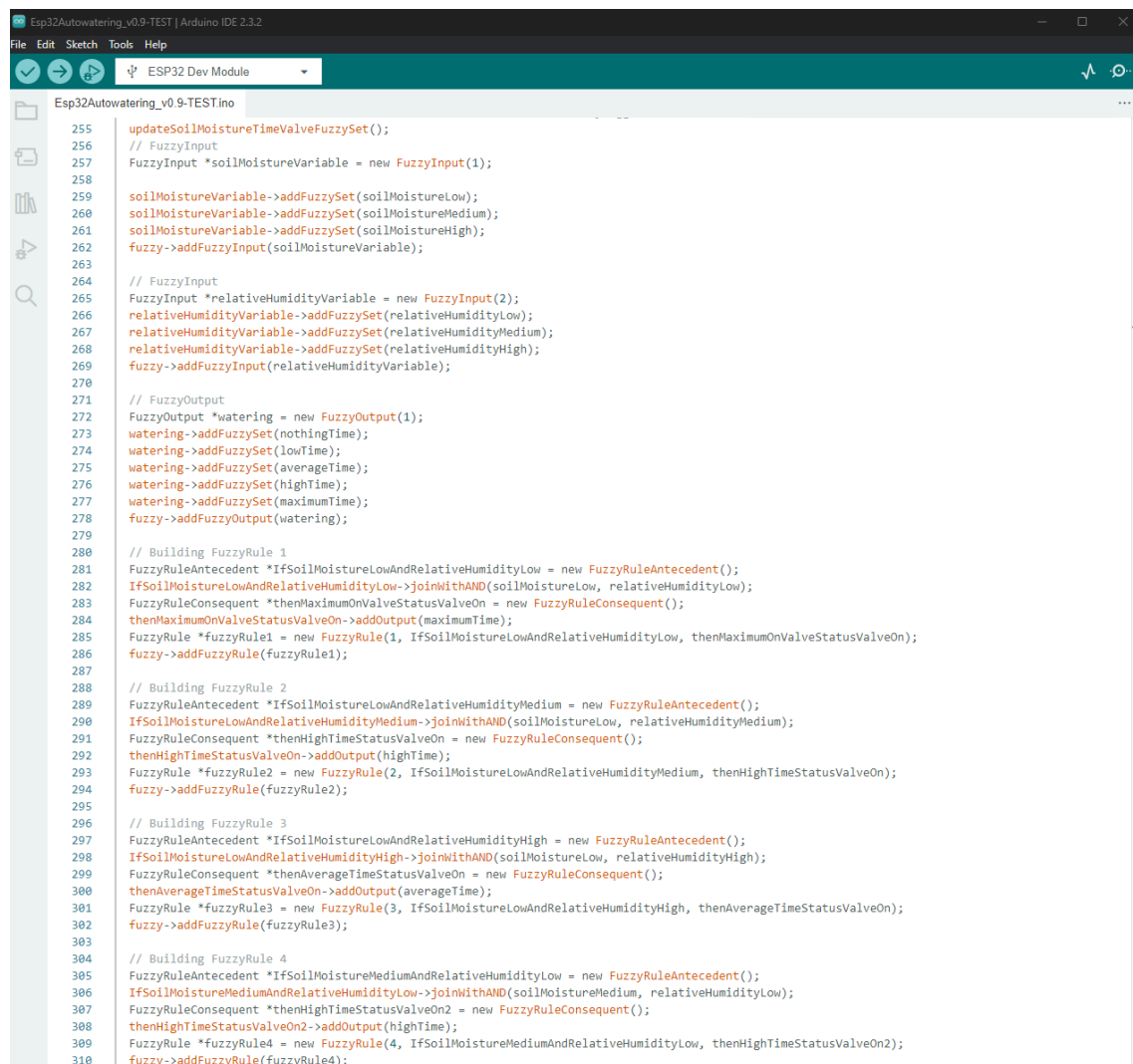
Implementación de lógica difusa en ESP32 para el control de las variables

El sistema de riego inteligente utiliza lógica difusa en un ESP32, en el código fuente del modelo difuso en IDE Arduino se establecen variables de entrada como la humedad del suelo (soilMoistureVariable) y la humedad relativa (relativeHumidityVariable), y una variable de salida (watering) que representa el tiempo de activación de la electroválvula, véase figura 32.

Se definen diferentes conjuntos difusos (low, médium y high) para modelar los niveles de humedad en las variables de entrada y para la variable de salida se establecen los conjuntos: nothingTime, lowTime, averageTime, highTime y maximumTime los conjuntos difusos para la variable de entrada humedad de suelo y variable de salida tiempo de riego son modificables en función de los parámetros de configuración de riego: mínima humedad de suelo y tiempo de

riego requerido, respectivamente, los cuales son definidos y actualizados por el usuario, al detectarse alguna modificación de los valores de estos parámetros, véase figura 32, los conjuntos difusos se actualizan, modificando de esta manera el comportamiento del sistema de riego.

Se han creado las reglas difusas (SI-ENTONCES) para calcular el tiempo de riego según las variables medidas, generando una salida continua mediante difusificación (entradas), inferencia y desdifusificación (salida). A diferencia de una lógica convencional (if-else, switch), que usa umbrales rígidos, el control difuso permite transiciones graduales y respuestas más estables y adaptativas, lo cual es ideal para riego por la variabilidad e incertidumbre de las condiciones ambientales [77].



```

Esp32Autowatering_v0.9-TEST.ino
255 updateSoilMoistureTimeValveFuzzySet();
256 // FuzzyInput
257 FuzzyInput *soilMoistureVariable = new FuzzyInput(1);
258
259 soilMoistureVariable->addFuzzySet(soilMoistureLow);
260 soilMoistureVariable->addFuzzySet(soilMoistureMedium);
261 soilMoistureVariable->addFuzzySet(soilMoistureHigh);
262 fuzzy->addFuzzyInput(soilMoistureVariable);
263
264 // FuzzyInput
265 FuzzyInput *relativeHumidityVariable = new FuzzyInput(2);
266 relativeHumidityVariable->addFuzzySet(relativeHumidityLow);
267 relativeHumidityVariable->addFuzzySet(relativeHumidityMedium);
268 relativeHumidityVariable->addFuzzySet(relativeHumidityHigh);
269 fuzzy->addFuzzyInput(relativeHumidityVariable);
270
271 // FuzzyOutput
272 FuzzyOutput *watering = new FuzzyOutput(1);
273 watering->addFuzzySet(nothingTime);
274 watering->addFuzzySet(lowTime);
275 watering->addFuzzySet(averageTime);
276 watering->addFuzzySet(highTime);
277 watering->addFuzzySet(maximumTime);
278 fuzzy->addFuzzyOutput(watering);
279
280 // Building FuzzyRule 1
281 FuzzyRuleAntecedent *IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityLow = new FuzzyRuleAntecedent();
282 IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityLow->joinWithAND(soilMoistureLow, relativeHumidityLow);
283 FuzzyRuleConsequent *thenMaximumOnValveStatusValveOn = new FuzzyRuleConsequent();
284 thenMaximumOnValveStatusValveOn->addOutput(maximumTime);
285 FuzzyRule *fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityLow, thenMaximumOnValveStatusValveOn);
286 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);
287
288 // Building FuzzyRule 2
289 FuzzyRuleAntecedent *IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityMedium = new FuzzyRuleAntecedent();
290 IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityMedium->joinWithAND(soilMoistureLow, relativeHumidityMedium);
291 FuzzyRuleConsequent *thenHighTimeStatusValveOn = new FuzzyRuleConsequent();
292 thenHighTimeStatusValveOn->addOutput(highTime);
293 FuzzyRule *fuzzyRule2 = new FuzzyRule(2, IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityMedium, thenHighTimeStatusValveOn);
294 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule2);
295
296 // Building FuzzyRule 3
297 FuzzyRuleAntecedent *IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityHigh = new FuzzyRuleAntecedent();
298 IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityHigh->joinWithAND(soilMoistureLow, relativeHumidityHigh);
299 FuzzyRuleConsequent *thenAverageTimeStatusValveOn = new FuzzyRuleConsequent();
300 thenAverageTimeStatusValveOn->addOutput(averageTime);
301 FuzzyRule *fuzzyRule3 = new FuzzyRule(3, IfSoilMoistureLowAndRelativeHumidityHigh, thenAverageTimeStatusValveOn);
302 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule3);
303
304 // Building FuzzyRule 4
305 FuzzyRuleAntecedent *IfSoilMoistureMediumAndRelativeHumidityLow = new FuzzyRuleAntecedent();
306 IfSoilMoistureMediumAndRelativeHumidityLow->joinWithAND(soilMoistureMedium, relativeHumidityLow);
307 FuzzyRuleConsequent *thenHighTimeStatusValveOn2 = new FuzzyRuleConsequent();
308 thenHighTimeStatusValveOn2->addOutput(highTime);
309 FuzzyRule *fuzzyRule4 = new FuzzyRule(4, IfSoilMoistureMediumAndRelativeHumidityLow, thenHighTimeStatusValveOn2);
310 fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule4);

```

Fig. 32 Implementación de lógica difusa en ESP32 para control de riego.

Interfaz del Fuzzy Logic Designer - Matlab

Puesto que, Domínguez [78] manifiesta que la conexión entre la humedad relativa y el tiempo de riego en las orquídeas es un factor esencial en su manejo. Diferentes estudios respaldan la idea de que, si la humedad del sustrato permanece constante, una reducción en la humedad relativa del ambiente podría implicar la necesidad de incrementar la frecuencia o el tiempo de riego para equilibrar la menor cantidad de agua disponible en el aire.

Por lo cual, se ha diseñado un modelo difuso para el riego representado en la figura 33, donde se han determinado como variables de entrada a la humedad del suelo (SoilMoisturePercent) y la humedad relativa (RelativeHumidity) y como variable de salida al tiempo de encendido de electroválvula en la sesión de riego (TimeValveTurnedOn). A través de la lógica difusa en Matlab, se ha modelado el sistema con inferencia Mamdani, el cual determina cuánto tiempo debe permanecer abierta la válvula de riego. Este tipo de enfoque permite un control más flexible y adaptativo, optimizando el uso del agua en función de las condiciones ambientales.

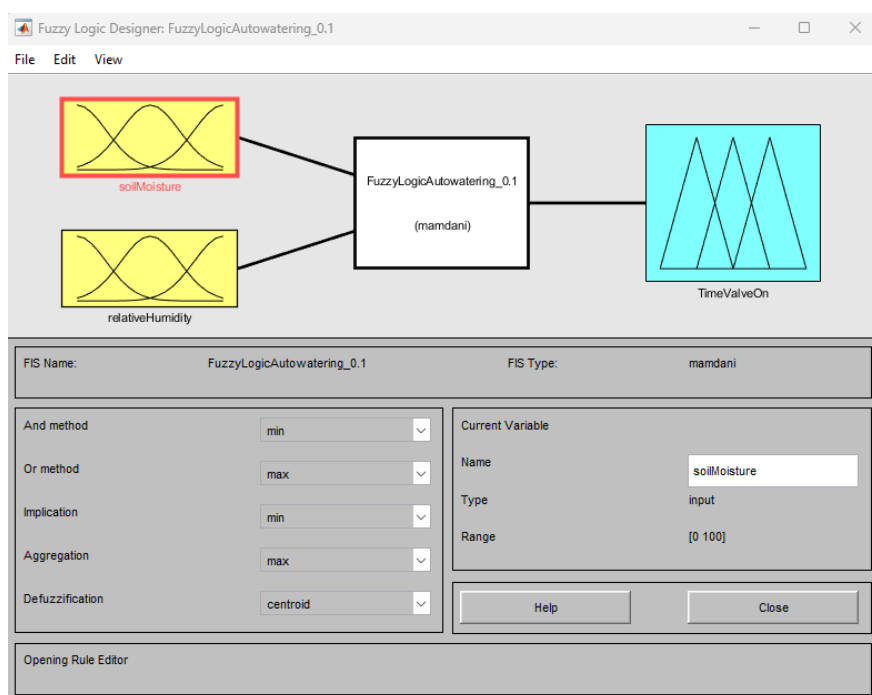


Fig. 33 Interfaz del Fuzzy Logic Designer

Funciones de pertenencia para la humedad relativa

La figura 34, representa la configuración de las funciones de pertenencia para la variable de entrada humedad relativa en un sistema de riego basado en lógica

difusa. Se utilizaron funciones de membresía trapezoidales para definir los niveles de humedad como baja, media y alta, lo que permite al sistema tomar decisiones más precisas sobre el tiempo de riego.

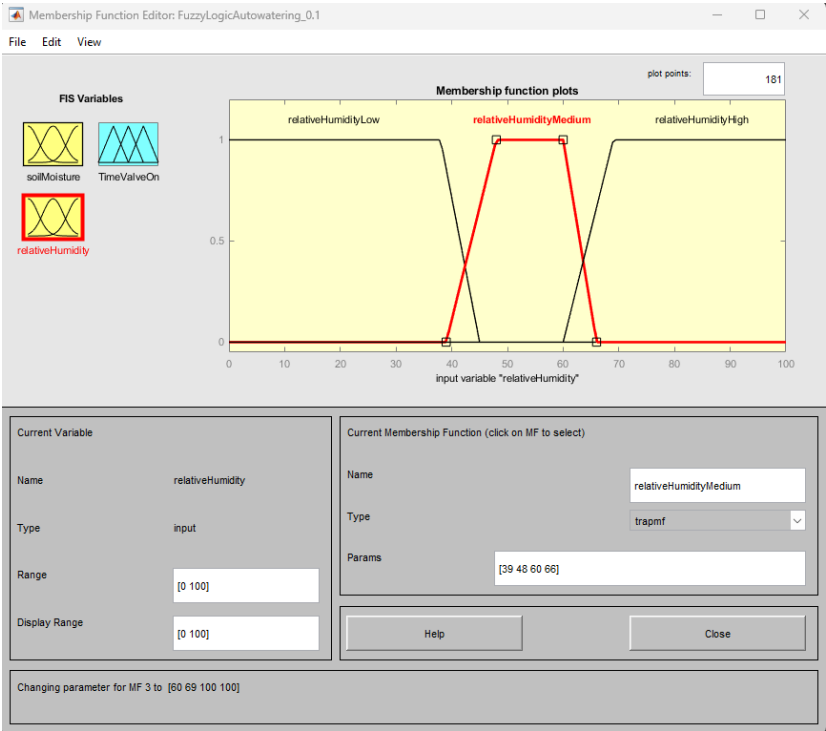


Fig. 34 Variable difusa de entrada: humedad relativa

Funciones de pertenencia para la humedad del suelo

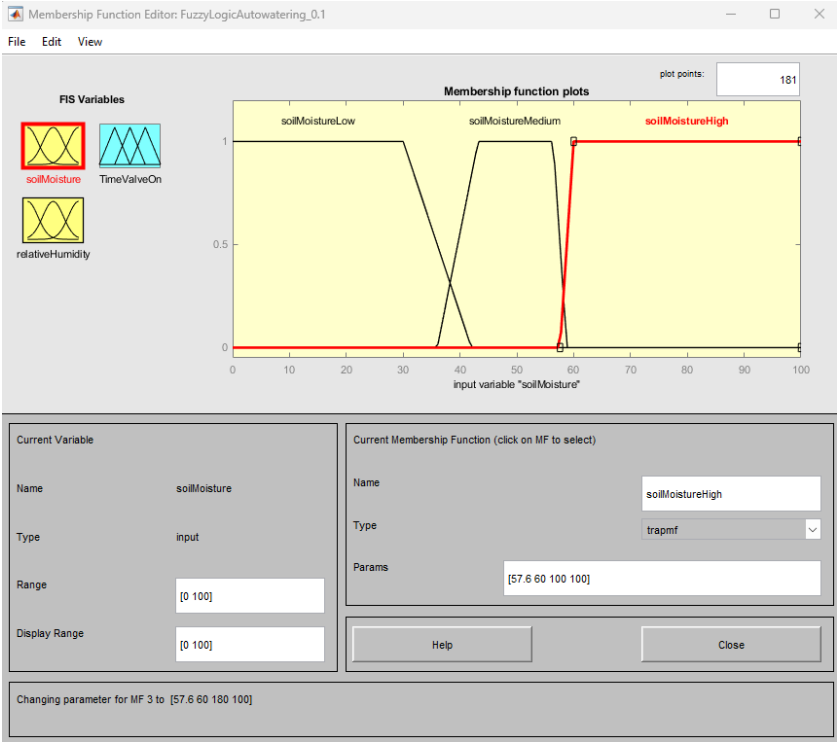


Fig. 35 Variable difusa de entrada: humedad del suelo

La figura 35, representa la configuración de las funciones de pertenencia para la variable de entrada humedad del suelo en un sistema de riego basado en lógica difusa. Se empleó funciones de membresía del tipo trapezoidales; puesto que este tipo de funciones de pertenencia permiten cambios suaves entre cada función de membresía para una variable difusa.

Funciones de pertenencia para el tiempo de apertura de la válvula

La figura 36, representa la configuración de las funciones de pertenencia para la variable de salida del sistema de riego basado en lógica difusa. Se han definido diferentes niveles de tiempo de apertura de la válvula (bajo, medio, alto y sin riego), lo que permite un control más preciso del riego en función de la humedad del suelo y la humedad relativa del aire. La función trapezoidal seleccionada garantiza una transición suave entre los niveles de riego, optimizando el uso del agua en el sistema.

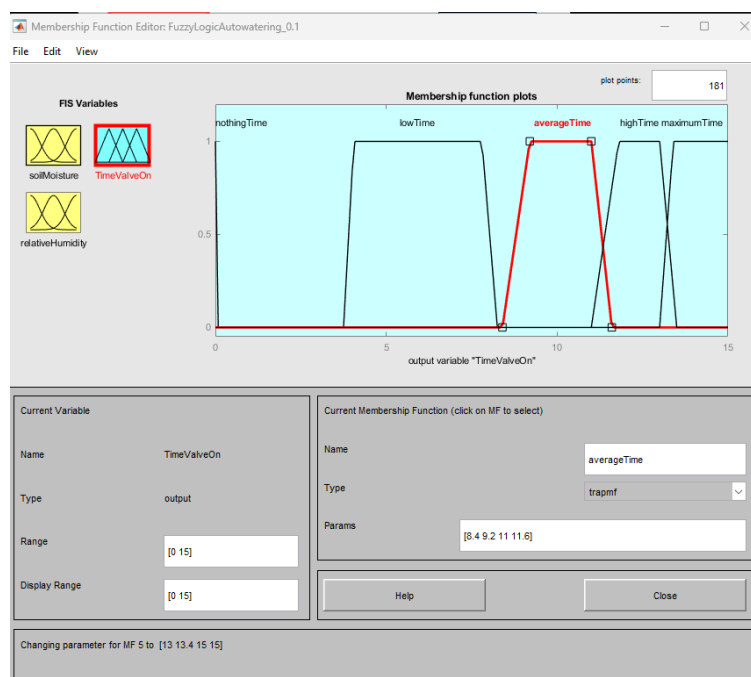


Fig. 36 Funciones de pertenencia para el tiempo de apertura de la válvula

C. Pruebas de Difusificación

De la figura 37, se puede apreciar que, para una misma humedad de suelo, si la humedad relativa es baja, entonces el tiempo de riego es mayor que si la humedad relativa es alta. Esto se debe a que las orquídeas absorben parte del agua del ambiente a través de la humedad relativa; en consecuencia, una

humedad ambiental baja incrementa la necesidad de riego. Este comportamiento puede es respaldado por lo señalado por Gómez y Guzmán (2021), quienes afirman que la humedad relativa incide directamente en la absorción hídrica de las orquídeas, siendo por ello considerada como una variable difusa de entrada en el sistema.

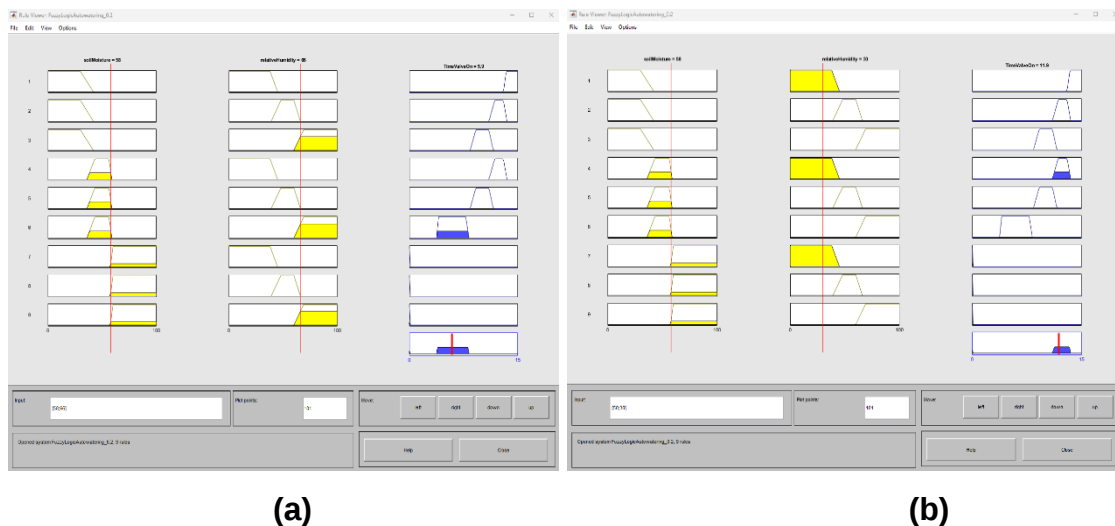


Fig. 37 a) Superficie de decisión difusa - baja humedad relativa y b) superficie de decisión difusa – alta humedad relativa

4.3 Resultados del objetivo específico 3: Evaluar el comportamiento y funcionamiento integral del sistema.

Con base en los datos obtenidos del sistema de riego para orquídeas, se realizó una evaluación integral mediante lógica difusa, con el fin de analizar su comportamiento y gestionar la incertidumbre y subjetividad presentes en las variables críticas que influyen en un riego óptimo. En este contexto, las variables del sistema y las variables configurables constituyen la base para el control y monitoreo, ya que registran en tiempo real parámetros ambientales, operativos y umbrales de configuración. Estos valores determinan las decisiones de riego en el sistema, tal como se presenta en la tabla V.

TABLA V. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES DE SISTEMA DEL RIEGO

<i>Variables de sistema</i>	<i>Descripción</i>
<i>AirTemperature</i>	Almacena la temperatura del ambiente (°C)
<i>DateLoadAt</i>	Fecha y hora de la lectura
<i>MessageStatus</i>	Muestra el estado de funcionamiento del sistema
<i>RelativeHumidity</i>	Porcentaje humedad relativa del ambiente
<i>SoilMoisturePercent</i>	Porcentaje humedad suelo (sustrato)
<i>SoilTemperature</i>	Temperatura (°C) del suelo (sustrato)
<i>TimeValveTurnedOn</i>	Tiempo (en segundos) en el que la electroválvula permanece encendida
<i>ValveStatus</i>	Estado de la electroválvula (ON/OFF).
<i>Volume</i>	Volumen de agua en una sesión de riego (en litros).

Nota. Elaboración a partir de los datos generados por el sistema de riego, donde se detallan las variables de sistema utilizadas para el monitoreo y control del riego de orquídeas.

Las variables del sistema registran en tiempo real las condiciones ambientales y operativas del riego, incluyendo la temperatura, la humedad, el estado de funcionamiento y los parámetros de la electroválvula. Esta información permite un control preciso y eficiente del suministro de agua para las orquídeas.

A. Análisis del sistema de riego – prototipo 1 (2 macetas, micro goteo)

TABLA VI. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO – PROTOTIPO 1 (2 MACETAS, MICRO GOTEO)

Parámetro Evaluado	Métrica	Resultado	Cumplimiento
Control de humedad	% de tiempo con humedad en rango óptimo (60-70%)	76% Esto significa que el sistema logró mantener la humedad del cultivo dentro del rango ideal durante el 76% del tiempo total de operación.	Alto
Adaptación ambiental	Adaptación a cambios de temperatura/humedad	90.5% El sistema ajustó sus decisiones correctamente en el 90.5% de las variaciones ambientales registradas.	Excelente
Eficiencia hídrica	Volumen total utilizado (litros)	4.14 L Se registró un consumo total de 4.14 litros durante los seis meses de evaluación.	Muy eficiente

Parámetro Evaluado	Métrica	Resultado	Cumplimiento
Volumen medio de riego	Volumen medio por sesión de riego (Mililitros)	24.49 ml (medio) 24.49 ml en cada sesión de riego prototipo 1. 12.25 ml por orquídea (medio)	Excelente
Frecuencia de riego	Tiempo (horas)	26.30 h (media) 169 ciclos de riego; cada 26.30 h en promedio.	Excelente
Duración de riego promedio	Tiempo medio por sesión de riego (segundos)	6 s (media) 0.27 h totales; 6 s por ciclo (media)	Excelente
Prevención de sequía	Eventos de humedad <60%	5 (0.6%) Significa que solo en 5 ocasiones (0.6% del total de mediciones) la humedad del suelo bajó de 60% (umbral crítico de sequía). Esto indica que el sistema mantuvo la humedad en niveles adecuados casi siempre → eficiencia muy alta.	Excelente
Prevención de exceso	Eventos de humedad >80%	8 (0.9%) Hubo 8 ocasiones (0.9% del total de mediciones) en que la humedad superó el 80% (riesgo de exceso de riego). El bajo número confirma que el sistema evitó saturar el sustrato y controló bien el exceso de agua.	Excelente
Confiabilidad operativa	Tasa de errores (ERR LongValveON)	0.6% Se registraron errores de activación prolongada de válvulas en solo 0.6% de los casos. Este valor extremadamente bajo refleja alta confiabilidad del sistema y mínima probabilidad de fallos operativos.	Bajo
Autonomía del sistema	Decisiones sin intervención humana	99.7% El sistema tomó decisiones de riego de forma autónoma en el 99.7% de las situaciones, requiriendo intervención humana en apenas el 0.3%. Esto demuestra que el sistema es casi completamente autónomo y fiable.	Excelente

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional en seis meses del prototipo 1.

La Tabla VI, presenta el análisis integral del sistema de riego, confirmando su

desempeño óptimo y adaptativo en el mantenimiento de condiciones ideales para el cultivo de orquídeas. Los resultados evidencian un funcionamiento altamente preciso, al mantener la humedad en el rango óptimo durante el 76% del tiempo, con una notable capacidad de adaptación ambiental (90.5%). En cuanto a eficiencia hídrica, el consumo total fue de apenas 4.14 litros en seis meses, lo que representa un nivel de aprovechamiento muy eficiente. Asimismo, el sistema mostró un control sobresaliente de extremos, limitando los eventos de sequía al 0.6% y los de encharcamiento al 0.9%, ambos clasificados como excelentes. Finalmente, la autonomía alcanzada (99.7% de decisiones automáticas) confirma un desempeño superior frente a los sistemas tradicionales. La implementación de lógica difusa permitió un control dinámico y proactivo, asegurando el desarrollo saludable de las plantas, validando su eficacia técnica y biológica como solución integral de riego inteligente.

Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 1

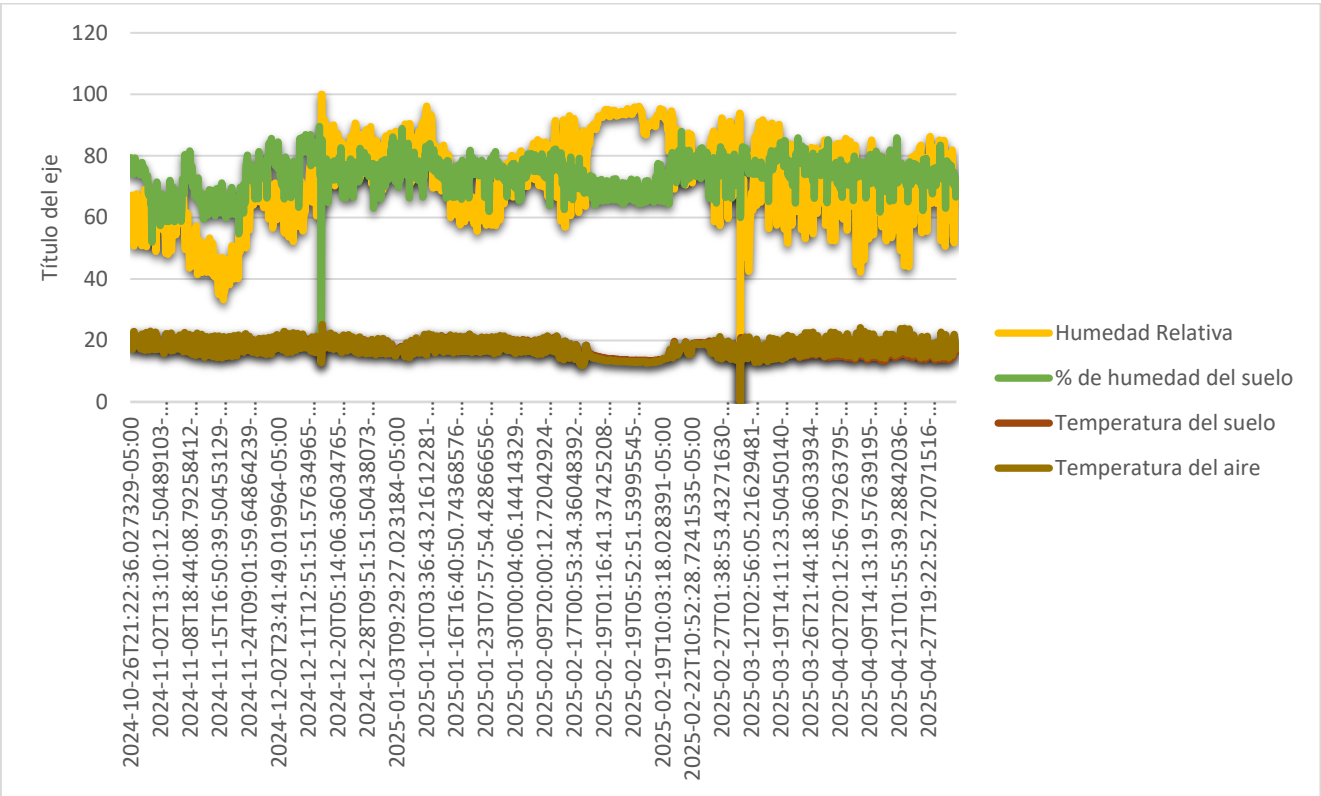


Fig. 38 Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 1

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional en seis meses del prototipo 1.

La Figura 38, muestra la evolución de la humedad relativa, la humedad del suelo,

la temperatura del aire y la temperatura del suelo durante síes meses. Se observa que la humedad relativa presenta una alta variabilidad, con valores que fluctúan entre 40% y 100%, reflejando los cambios propios de las condiciones climáticas. En contraste, el porcentaje de humedad del suelo se mantiene más estable en un rango de 60% a 80%, aunque presenta algunos picos anómalos que podrían atribuirse a riegos intensivos o fallas de sensor. La temperatura del suelo y del aire muestran un comportamiento relativamente constante, entre 15 °C y 23 °C, aunque en marzo de 2025 ambas variables registran una caída significativa, posiblemente asociada a un evento climático particular. En general, el suelo conserva un nivel adecuado de humedad y estabilidad térmica, lo cual favorece las condiciones agrícolas, mientras que la variabilidad de la humedad relativa responde a la dinámica atmosférica externa.

A. Análisis del sistema de riego – prototipo 2 (20 macetas, micro goteo)

TABLA VII. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO – PROTOTIPO 2 (20 MACETAS, MICRO GOTEO)

Parámetro Evaluado	Métrica	Resultado	Cumplimiento
Control de humedad	% de tiempo con humedad en rango óptimo (60-70%)	74% Esto significa que el sistema logró mantener la humedad del cultivo dentro del rango ideal durante el 74% del tiempo total de operación	Alto
Adaptación ambiental	Adaptación a cambios de temperatura/humedad	85% El sistema ajustó sus decisiones correctamente en el 85% de las variaciones ambientales registradas.	Alto
Eficiencia hídrica	Volumen total utilizado (litros)	29.64 L Se registró un consumo total de 29.64 litros durante los seis meses de evaluación.	Moderado
Volumen medio de riego	Volumen medio por sesión de riego (Mililitros)	282.24 ml (medio) 282.24 ml en cada sesión de riego prototipo 2. 14.1 ml por orquídea (medio)	Bueno
Frecuencia de riego medio	Tiempo (horas)	42.14 h (media) 105 ciclos; cada 42.14 h en promedio	Excelente

Parámetro Evaluado	Métrica	Resultado	Cumplimiento
Duración de riego promedio	Tiempo medio por sesión de riego (segundos)	14.23 s (media) 0.42 h totales; 14.23 s por ciclo (media)	Bueno
Prevención de sequía	Eventos de humedad <60%	12 (1.5%) Significa que solo en 12 ocasiones (1.5% del total de mediciones) la humedad del suelo bajó de 60% (umbral crítico de sequía). Esto indica que el sistema mantuvo la humedad en niveles adecuados casi siempre → eficiencia alta.	Alto
Prevención de exceso	Eventos de humedad >80%	4 (0.6%) Hubo 6 ocasiones (0.6% del total de mediciones) en que la humedad superó el 80% (riesgo de exceso de riego). El bajo número confirma que el sistema evitó saturar el sustrato y controló bien el exceso de agua.	Excelente
Confiabilidad operativa	Tasa de errores (ERR LongValveON)	0.7% Se registraron errores de activación prolongada de válvulas en solo 0.7% de los casos. Este valor extremadamente bajo refleja alta confiabilidad del sistema y mínima probabilidad de fallos operativos.	Bajo
Autonomía del sistema	Decisiones sin intervención humana	98.9% El sistema tomó decisiones de riego de forma autónoma en el 98.9% de las situaciones, requiriendo intervención humana en apenas el 1.1%. Esto demuestra que el sistema es casi completamente autónomo y fiable.	Excelente

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional en seis meses del prototipo 2.

La Tabla VII, presenta el análisis de desempeño del sistema, evidenciando su eficacia en el control de humedad, adaptabilidad ambiental y gestión racional del recurso hídrico. El sistema logró mantener la humedad dentro del rango óptimo (60%–70%) durante el 74% del tiempo, lo que garantiza hidratación constante, aunque con margen de mejora para alcanzar niveles superiores de estabilidad (75%–80%). Su capacidad de adaptación frente a variaciones de temperatura y humedad alcanzó el 85%, lo que confirma su solidez en entornos cambiantes. En cuanto al uso de agua, el consumo total fue de 29.64 litros en seis meses, clasificado como moderado, lo que sugiere eficiencia aceptable, pero con potencial de optimización. La prevención de eventos extremos mostró un

comportamiento balanceado: 1.5% de sequías (<60%) y solo 0.6% de excesos (>80%), siendo este último catalogado como excelente, reflejando un algoritmo de control que mitiga riesgos tanto por deshidratación como por encharcamiento. Finalmente, la confiabilidad operativa se mantuvo en 0.7% de errores (nivel bajo), mientras que la autonomía del 98.9% confirma su capacidad tecnológica, reduciendo la necesidad de intervención humana sin comprometer precisión

Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 2

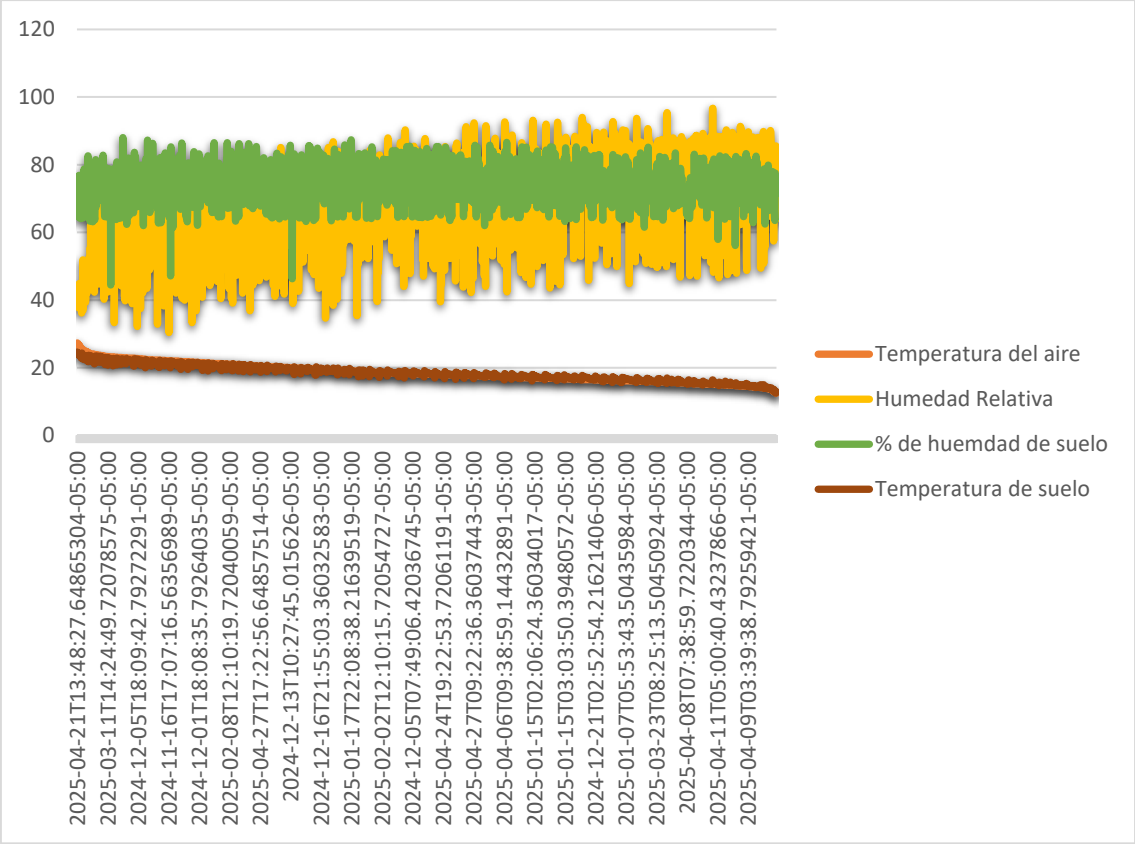


Fig. 39 Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 2

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional en seis meses del prototipo 2.

La Figura 39, muestra la evolución de la humedad relativa durante seis meses, el porcentaje de humedad del suelo, la temperatura del aire y la temperatura del suelo registrados por el sistema de riego – Prototipo 2, durante seis meses. Se observa que la humedad relativa (amarillo) mantiene un rango entre 40% y 90%, con una tendencia más estable que en el prototipo 1, lo que indica un mejor control de la variable atmosférica. El porcentaje de humedad del suelo (verde)

se mantiene en valores intermedios de 60% a 85%, con oscilaciones frecuentes que sugieren la acción del micro goteo para evitar pérdidas de humedad. En cuanto a la temperatura del suelo y del aire (marrón y rojo), ambas presentan un comportamiento estable en torno a 18 a 25 grados centígrados, aunque con ligeras fluctuaciones que reflejan la dinámica térmica ambiental. En general, el prototipo 2 evidencia un mejor amortiguamiento de la variabilidad de la humedad relativa y una estabilidad adecuada en la humedad del suelo, lo que confirma la eficiencia del sistema en la regulación de las condiciones de riego.

B. Análisis del sistema de riego – prototipo 3 (10 macetas, micro aspersión)

TABLA VIII. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO – PROTOTIPO 3 (10 MACETAS, MICRO ASPERSIÓN)

Parámetro Evaluado	Métrica	Resultado	Cumplimiento
Control de humedad	% de tiempo con humedad en rango óptimo (60-70%)	71% Significa que el sistema mantuvo la humedad del cultivo dentro del rango ideal el 71% del tiempo total de operación.	Alto
Adaptación ambiental	Adaptación a cambios de temperatura / humedad	97.60% El sistema ajustó sus decisiones correctamente en el 97.6% de las variaciones ambientales registradas.	Excelente
Eficiencia hídrica	Volumen total utilizado (litros)	15.06 L Se registró un consumo total de 15.06 litros durante los seis meses de evaluación.	Moderado
Volumen medio de riego	Volumen medio por sesión de riego (Mililitros)	165.54 ml 165.54 ml en cada sesión de riego prototipo 3. 16.6 ml por orquídea (medio)	Excelente
Frecuencia de riego medio	Tiempo (horas)	49.09 h 91 ciclos; cada 49.09 h en promedio	Excelente
Duración de riego promedio	Tiempo medio por sesión de riego (segundos)	3.8 s 16.1 min totales; 3.8 s por ciclo (media)	Excelente
Prevención de sequía	Eventos de humedad <60%	14 (1.6%) Significa que solo en 14 ocasiones (1.6 % del total de mediciones) la humedad del suelo bajó de 60% (umbral crítico de sequía). Esto indica que el sistema mantuvo la humedad en niveles	Alto

Parámetro Evaluado	Métrica	Resultado	Cumplimiento
		adecuados casi siempre → eficiencia muy alta.	
Prevención de exceso	Eventos de humedad >80%	11 (2.1%) Significa que solo en 11 ocasiones (2.1% del total de mediciones) la humedad del suelo bajó de 60% (umbral crítico de sequía). Esto indica que el sistema mantuvo la humedad en niveles adecuados casi siempre → eficiencia muy alta.	Alto
Confiabilidad operativa	Tasa de errores (ERR LongValveON)	0.1% Se registraron errores de activación prolongada de válvulas en solo 0.1% de los casos. Este valor refleja alta confiabilidad del sistema y mínima probabilidad de fallos operativos.	Muy Bajo
Autonomía del sistema	Decisiones sin intervención humana	99.9% El sistema tomó decisiones de riego de forma autónoma en el 99.9% de las situaciones, requiriendo intervención humana en apenas el 0.3%. Esto demuestra que el sistema es casi completamente autónomo y fiable.	Excelente

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional en 6 meses del prototipo 3.

La Tabla VIII, presenta el análisis del Prototipo 3, donde se evidencia que el sistema de riego mantiene una notable capacidad de adaptación ambiental (97.6%) y un alto nivel de autonomía (99.9%), operando prácticamente sin fallos (0.1%) y respondiendo de manera eficaz a las variaciones de temperatura y humedad. El control de humedad se ubicó en un 71% del tiempo dentro del rango óptimo (60%–70%), clasificado como alto, lo que refleja un desempeño aceptable, pero con margen de optimización. En cuanto a eficiencia hídrica, el consumo total fue de 15.06 litros en seis meses, considerado eficiente. La prevención de eventos extremos mostró un comportamiento más exigente: 1.6% de sequías (<60%) y 2.1% de excesos (>80%), ambos catalogados como altos, lo que indica la necesidad de un ajuste en los parámetros de activación y duración del riego para reducir riesgos de deshidratación y encharcamiento. En conjunto, el prototipo demuestra un desarrollo tecnológico avanzado y alta confiabilidad, aunque aún requiere calibraciones adicionales para optimizar el uso del agua y garantizar condiciones ideales y sostenibles para el cultivo de orquídeas.

Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo)

registradas por el sistema de riego – Prototipo 3

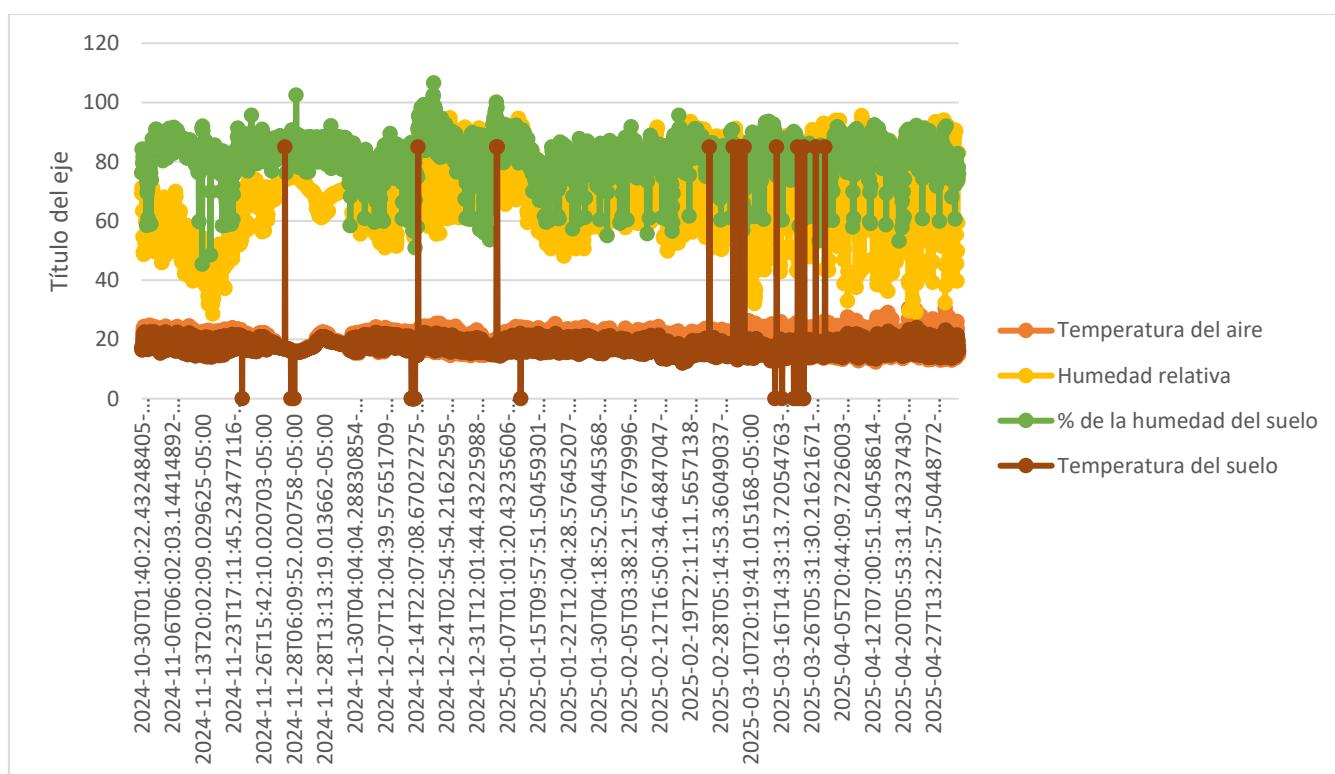


Fig. 40 Comportamiento de la humedad (aire y suelo) y la temperatura (aire y suelo) registradas por el sistema de riego – Prototipo 3

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional en 6 meses del prototipo 3.

La Figura 40, presenta el comportamiento de la humedad relativa del aire, el porcentaje de humedad del suelo, la temperatura del aire y la temperatura del suelo en el tiempo durante seis meses de evaluación. Se observa que la humedad relativa (línea amarilla) fluctúa entre 40% y 100%, con variaciones marcadas a lo largo del día, lo cual es propio de las condiciones atmosféricas y del ciclo día-noche. El porcentaje de humedad del suelo (línea verde) se mantiene mayormente en un rango de 60% a 90%, evidenciando que el sistema de riego mantiene condiciones adecuadas para la planta; sin embargo, se presentan algunos picos altos que podrían corresponder a riegos automáticos activados por el controlador difuso. En cuanto a la temperatura del aire y del suelo (líneas marrones), ambas se mantienen estables entre 15 °C y 25 °C, con ligeras oscilaciones normales, aunque se aprecian caídas puntuales abruptas que podrían estar relacionadas con anomalías en los sensores o condiciones climáticas extremas. En general, los datos muestran que el sistema regula de manera eficiente la humedad del suelo, mientras que las variaciones en la

humedad relativa y en la temperatura responden principalmente a factores externos del ambiente.

TABLA IX. COMPARACIÓN DE INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO EN TRES PROTOTIPOS CON DIFERENTES NÚMEROS DE MACETAS Y TIPO DE RIEGO

Indicador / Prototipo	Prototipo 1 (2 macetas – micro goteo)	Prototipo 2 (20 macetas – micro goteo)	Prototipo 3 (10 macetas – micro aspersión)
Control de humedad (% tiempo 60–70%)	76% – Alto	74% – Alto	71% – Alto
Adaptación ambiental	90.5% – Excelente	85% – Alto	97.6% – Excelente
Eficiencia hídrica (volumen total)	4.14 L – Muy Eficiente	29.64 L – Moderado	15.06 L – Eficiente
Volumen medio de riego (riego por orquídea)	24.49 ml (12.25 ml) - Excelente	282.24 ml (14.1 ml) - Bueno	165.54 ml (16.6 ml) - Excelente
Frecuencia de riego medio (intervalo re riego)	26.30 h - Excelente	42.14 h - Excelente	49.09 h - Excelente
Duración de riego promedio (sesión de riego)	6 s - Excelente	14.23 s - Bueno	3.8 s - Excelente
Prevención de sequía (<60% humedad)	5 (0.6%) – Excelente	12 (1.5%) – Alto	14 (1.6%) – Alto
Prevención de exceso (>80% humedad)	7.5 (0.9%) – Excelente	5 (0.6%) – Excelente	11 (2.1%) – Alto
Confiabilidad operativa	0.6% – Bajo (tasa de error)	0.7% – Bajo (tasa de error)	0.1% – Muy Bajo (tasa de error)
Autonomía del sistema	99.7% – Excelente	98.9% – Excelente	99.9% – Excelente
Tipo de riego	Micro goteo	Micro goteo	Micro aspersión

Nota. Datos obtenidos del sistema bidireccional de los tres prototipos.

La Tabla IX muestra que los tres prototipos lograron control de humedad Alto (P1: 76%, P2: 74%, P3: 71%) y autonomía Excelente ($\geq 98.9\%$). En adaptación ambiental, destacó el Prototipo 3 (97.6% – Excelente), seguido del Prototipo 1 (90.5% – Excelente), mientras que el Prototipo 2 fue Alto (85%).

En eficiencia hídrica, el Prototipo 1 fue el más eficiente (4.14 L), el Prototipo 3 tuvo consumo intermedio (15.06 L) y el Prototipo 2 el mayor volumen total (29.64 L), acorde a su mayor escala. Operativamente, P1 regó con mayor frecuencia (26.30 h), P2 tuvo la mayor duración por sesión (14.23 s) y P3 la menor frecuencia (49.09 h) con la menor duración (3.8 s). En eventos críticos, P1 presentó la menor sequía (0.6%), P2 el mejor control del exceso (0.6%), y P3 la mayor incidencia de exceso (2.1%). La tasa de error (ERR LongValveON) fue baja en todos, especialmente en P3 (0.1%), indicando alta confiabilidad operativa.

4.4 Resultados del objetivo general: Determinar la influencia de la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca.

Para garantizar la confiabilidad de los resultados, se analizó estadísticamente el desempeño de los prototipos, comenzando con la comprobación de normalidad de los datos.

Prueba de Normalidad

a. Plantear las hipótesis

H_0 : Los datos tienen una distribución normal

H_a : Los datos no tienen una distribución normal

b. Nivel de significancia

Confianza 95%

Significancia 5%

c. Prueba estadística a emplear

Anderson-Darling

Kolmogorov-Smirnov

Jarque-Bera

D'Agostino

d. Criterio de decisión

Si $p < 0,05$ Se rechaza la H_0 (no hay normalidad)

Si $p \geq 0,05$ Se acepta la H_0 (hay normalidad)

Los resultados de las pruebas de normalidad se muestran en las tablas X, XI y XII.

TABLA X. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PROTOTIPO 1

	Anderson-Darling	K-S (p-value)	Jarque-Bera (p-value)	D'Agostino (p-value)	Resultado
AirTemperature	4.570 > 0.786	0.0319	0.0128	0.0153	NO NORMAL
RelativeHumidity	9.574 > 0.786	0.0005	0.0000	0.0000	NO NORMAL
SoilMoisturePercent	32.896 > 0.786	0.0000	0.0000	0.0000	NO NORMAL
SoilTemperature	11.564 > 0.786	0.0001	0.0000	0.0000	NO NORMAL

Nota. Jupyter Noteboook - Python.

TABLA XI. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PROTOTIPO 2

	Anderson-Darling	K-S (p-value)	Jarque-Bera (p-value)	D'Agostino (p-value)	Resultado
AirTemperature	18.715 > 0.786	0.0000	0.0000	0.0000	NO NORMAL
RelativeHumidity	15.033 > 0.786	0.0000	0.0000	0.0000	NO NORMAL
SoilMoisturePercent	5.769 > 0.786	0.0040	0.0000	0.0000	NO NORMAL
SoilTemperature	8.297 > 0.786	0.0002	0.0000	0.0000	NO NORMAL

Nota. Jupyter Noteboook - Python.

TABLA XII. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA EL PROTOTIPO 3

	Anderson-Darling	K-S (p-value)	Jarque-Bera (p-value)	D'Agostino (p-value)	Resultado
AirTemperature	31.696 > 0.786	0.0000	0.0000	0.0000	NO NORMAL
RelativeHumidity	11.550 > 0.786	0.0001	0.0000	0.0000	NO NORMAL
SoilMoisturePercent	43.924 > 0.786	0.0000	0.0000	0.0000	NO NORMAL
SoilTemperature	436.96 > 0.786	0.0000	0.0000	0.0000	NO NORMAL

Nota. Jupyter Noteboook - Python.

e. Decisión y conclusión

Como $p < 0,05$ entonces se rechaza H_0 y acepta la H_a , es decir, los datos de los tres prototipos no siguen una distribución normal.

Por lo tanto: se empleó una prueba estadística NO PARAMÉTRICA.

Se trabajó con unidad de análisis diaria por prototipo para minimizar la

dependencia serial de lecturas (~cada 2 horas) y debido también a gran cantidad de lecturas con valor de cero en volumen y tiempo de riego. Por ello, las métricas de riego se normalizaron por maceta (litros/maceta/día; segundos/maceta/día). La comparación se realizó con la prueba no paramétrica de Friedman (bloques = días; tratamientos = prototipos), reportando Kendall's W como tamaño de efecto. Para comparaciones por pares se aplicó Nemenyi (p-ajustados). Dado el alto porcentaje de días sin riego, se analizó también la intensidad condicionada a riego (>0) y, como complemento, se estimó la mediana de diferencias de Hodges–Lehmann (HL) y el tamaño de efecto rank-biserial (Wilcoxon).

En la TABLA XIII se muestran los descriptivos robustos (mediana e IQR) y el porcentaje de días con riego. La TABLA XIV resume la intensidad cuando efectivamente hubo riego (>0). Los contrastes globales con Friedman y su tamaño de efecto (Kendall's W) se reportan en la TABLA XV, mientras que las comparaciones múltiples por pares (Nemenyi, p-ajustados) aparecen en la TABLA XVI. Finalmente, la TABLA XVII presenta los efectos pareados complementarios (Hodges–Lehmann y rank-biserial) para cuantificar dirección y magnitud. En todas las tablas, 'P1', 'P2' y 'P3' denotan, respectivamente, Prototipo 1 (2 macetas), Prototipo 2 (20 macetas) y Prototipo 3 (10 macetas); la notación "mediana [IQR]" corresponde a la mediana y al rango intercuartílico (IQR = Q3 – Q1) calculados sobre los valores diarios.

TABLA XIII. DESCRIPTIVOS DIARIOS POR PROTOTIPO (TODOS LOS DÍAS). N (BLOQUES) = 166.

Métrica (unidad)	P1 (mediana [IQR])	P2 (mediana [IQR])	P3 (mediana [IQR])
Litros/maceta/día (L)	0.000 [0.000–0.00775]	0.000 [0.000–0.01557]	0.000 [0.000–0.01605]
Segundos/maceta/día (s)	0.000 [0.000–2.432]	0.000 [0.000–0.7449]	0.000 [0.000–0.3310]
Humedad del sustrato (%)	75.10 [73.52–76.49]	73.00 [70.87–76.47]	81.99 [78.26–84.75]
% de días con riego (>0)	33.13%	39.76%	33.73%

Nota. Jupyter Notebook – Python.

TABLA XIV. INTENSIDAD DIARIA CUANDO HAY RIEGO (>0).

Métrica (unidad)	P1 (mediana [IQR])	P2 (mediana [IQR])	P3 (mediana [IQR])
Litros/maceta/día (solo >0) (L)	0.0145 [0.0080–0.0200]	0.0179 [0.01271–0.02735]	0.0211 [0.01605–0.0296]
Segundos/maceta/día (solo >0) (s)	3.547 [2.519–5.162]	0.9197 [0.6264–1.416]	0.4353 [0.3310–0.6457]

Nota. Jupyter Notebook – Python.

TABLA XV. PRUEBA DE FRIEDMAN POR MÉTRICA.

Métrica	n (días)	k	χ^2_{Friedman}	p-valor	Kendall's W
Litros/maceta/día	166	3	4.581	0.101226	0.0138
Segundos/maceta/día	166	3	7.157	0.027924	0.0216
Humedad del sustrato (%)	166	3	147.940	< 0.0001	0.4456

Nota. Jupyter Notebook – Python.

TABLA XVI. COMPARACIONES MÚLTIPLES POST-HOC (NEMENYI; P-VALORES AJUSTADOS).

Métrica	Par	p-aj (Nemenyi)
Litros/maceta/día	P1–P2	0.237539
Litros/maceta/día	P1–P3	0.515517
Litros/maceta/día	P2–P3	0.860892
Segundos/maceta/día	P1–P2	0.771656
Segundos/maceta/día	P1–P3	0.104912
Segundos/maceta/día	P2–P3	0.370438
Humedad del sustrato (%)	P1–P2	0.299651
Humedad del sustrato (%)	P1–P3	< 0.0001
Humedad del sustrato (%)	P2–P3	< 0.0001

Nota. Jupyter Notebook – Python.

TABLA XVII. EFECTOS PAREADOS COMPLEMENTARIOS (HL Y RANK-BISERIAL)

Métrica / subconjunto	Par	HL (unidad)	p (Wilcoxon)	rank-biserial
Litros (todos los días)	P1–P2	0.0000 L	0.1020	-0.1893
Litros (todos los días)	P1–P3	0.0000 L	0.0944	-0.2053
Litros (todos los días)	P2–P3	0.0000 L	0.8646	-0.0204
Litros (solo >0)	P1–P2	-0.00810 L	0.1207	-0.3834
Litros (solo >0)	P1–P3	-0.00740 L	0.2226	-0.2971
Litros (solo >0)	P2–P3	-0.00365 L	0.1207	-0.3333
Segundos (todos los días)	P1–P2	0.0000 s	1.17×10^{-5}	-0.5075
Segundos (todos los días)	P1–P3	0.0000 s	9.36×10^{-9}	-0.7048
Segundos (todos los días)	P2–P3	0.0000 s	6.08×10^{-5}	-0.4788
Segundos (solo >0)	P1–P2	+2.5876 s	4.77×10^{-7}	-1.0000
Segundos (solo >0)	P1–P3	+3.0527 s	2.38×10^{-7}	-1.0000
Segundos (solo >0)	P2–P3	+0.39195 s	2.76×10^{-3}	-0.6184
Humedad (todos los días)	P1–P2	+1.1951 pp	0.1708	-0.1226
Humedad (todos los días)	P1–P3	-6.9400 pp	1.30×10^{-23}	-0.8963
Humedad (todos los días)	P2–P3	-7.9558 pp	1.19×10^{-24}	-0.9172

Nota. Jupyter Notebook – Python.

La TABLA XIII muestra los descriptivos robustos por prototipo: la mediana diaria de litros y segundos por maceta es cero debido a la elevada proporción de días sin riego, mientras que la humedad del sustrato es mayor en P3. Los contrastes globales (TABLA XV) no evidencian diferencias en consumo hídrico ($\chi^2=4.581$; $p=0.101$; $W=0.0138$) pues $p>0.05$ y W es muy pequeño; así mismo, muestran una señal global pequeña en tiempo de riego ($\chi^2=7.157$; $p=0.0279$; $W=0.0216$)

dado que, $p < 0.05$ aunque W aún sigue siendo pequeño; y confirman diferencias marcadas en humedad ($\chi^2 = 147.940$; $p < 0.0001$; $W = 0.4456$) con un efecto moderado alto con $p < 0.05$ y W moderado. Las comparaciones múltiples de Nemenyi (TABLA XVI) corroboran que P3 difiere de P1 y P2 en humedad, mientras que no se detectan pares significativos en litros ni segundos bajo este ajuste. Al condicionar a días con riego (TABLA XIV), se observa que P1 aplica pulsos de mayor duración que P2 y P3, y P2 más que P3; los efectos pareados (TABLA XVII) cuantifican dichas diferencias y la magnitud a favor de P3 en humedad.

Los resultados integran consumo y control de humedad. En consumo, se observa comportamiento comparable entre prototipos en litros/maceta/día (TABLAS XIII y XV), pese a tendencias no concluyentes en la intensidad por evento (TABLA XIV). El tiempo de riego presenta señal global mínima (TABLA XV); sin embargo, al analizar solo días con riego aparece un patrón consistente $P1 > P2 > P3$ en duración por evento (TABLAS XIV y XVII). La humedad del sustrato muestra diferencias robustas a favor de P3 (TABLAS XIII, XV y XVI) con tamaños de efecto grandes (TABLA XVII), lo que sugiere una dosificación temporal más eficiente en P3 para sostener niveles de humedad superiores sin incrementar el consumo diario.

Con unidad diaria y normalización por maceta, se concluye que: (i) el consumo hídrico diario por maceta no difiere significativamente entre prototipos (TABLA XV); (ii) el tiempo diario de riego difiere globalmente con efecto muy pequeño, y los análisis condicionados confirman que P1 aplica pulsos más largos que P2 y P3 (TABLAS XIV y XVII); (iii) P3 mantiene niveles de humedad del sustrato significativamente más altos que P1 y P2 (TABLAS XIII, XV y XVI). En términos operativos, P3 logra mejor regulación de humedad con dosificación más eficiente y sin aumento del consumo diario.

Desarrollo y crecimiento de orquídeas

Se evaluó también las condiciones de salud de orquídeas de cada uno de los prototipos, tomando en consideración su altura de tallo, altura de vara floral, cantidad de hojas, condiciones de hojas, raíz y estado de salud, estas métricas fueron validadas por el experto agrónomo experto MSc. Ing. Elfer Neira Huamán, véase anexo 6. Esta información se puede apreciar en las figuras 41 a 48.

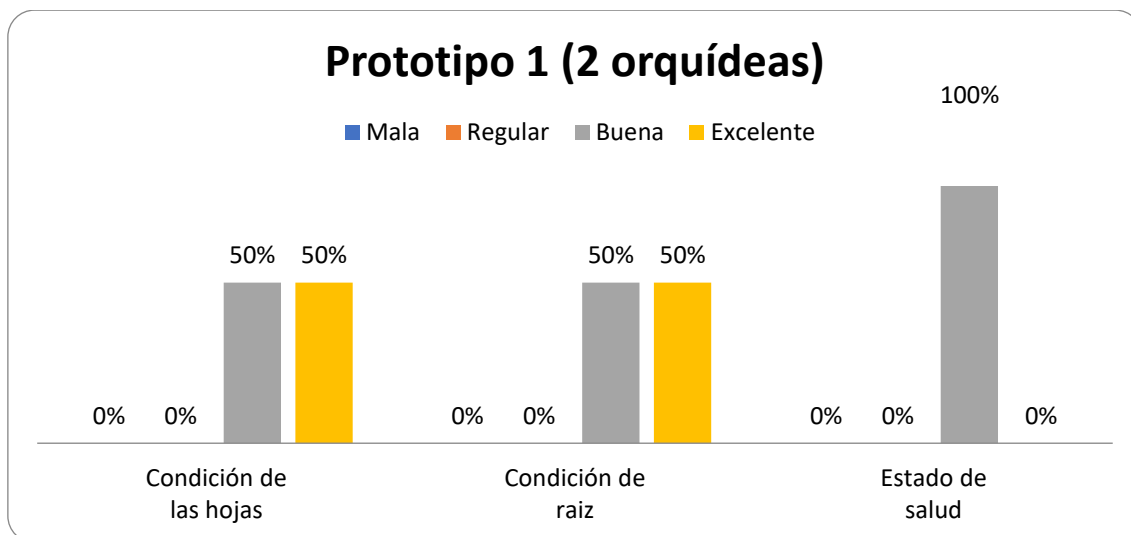


Fig. 41 Condiciones de salud de orquídeas – Prototipo 1

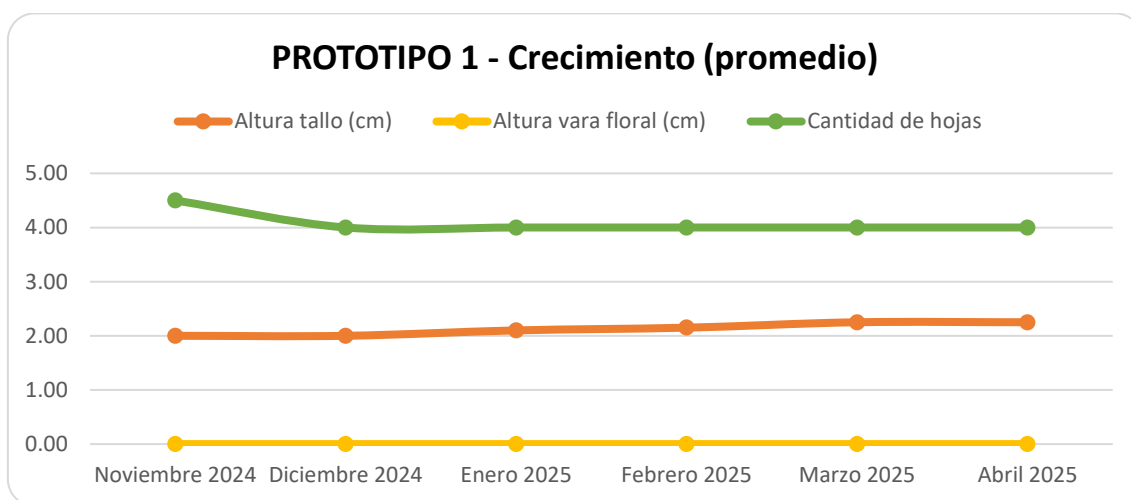


Fig. 42 Crecimiento de orquídeas – Prototipo 1

El gráfico 41 sugiere que, en el escenario de menor escala (2 orquídeas), el sistema logró sostener condiciones de planta favorables (sin categorías “mala” o “regular”) en concordancia con sus indicadores de control y prevención de extremos de humedad reportados en el estudio. En la Figura 42 (Prototipo 1) evidencia un crecimiento promedio moderado del tallo entre noviembre 2024 y abril 2025, con ligera estabilización al final. La cantidad de hojas disminuye en diciembre y luego se mantiene estable alrededor de 4 hojas durante el resto del periodo. No se registra desarrollo de vara floral (0 cm), por lo que el comportamiento observado corresponde principalmente a crecimiento vegetativo bajo condiciones de riego estables.

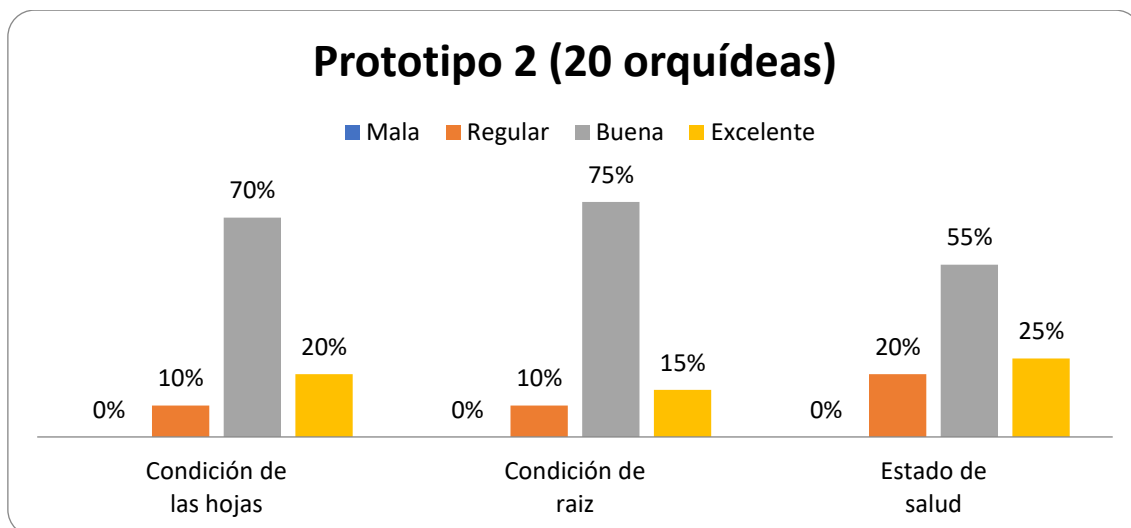


Fig. 43 Condiciones de salud de orquídeas – Prototipo 2

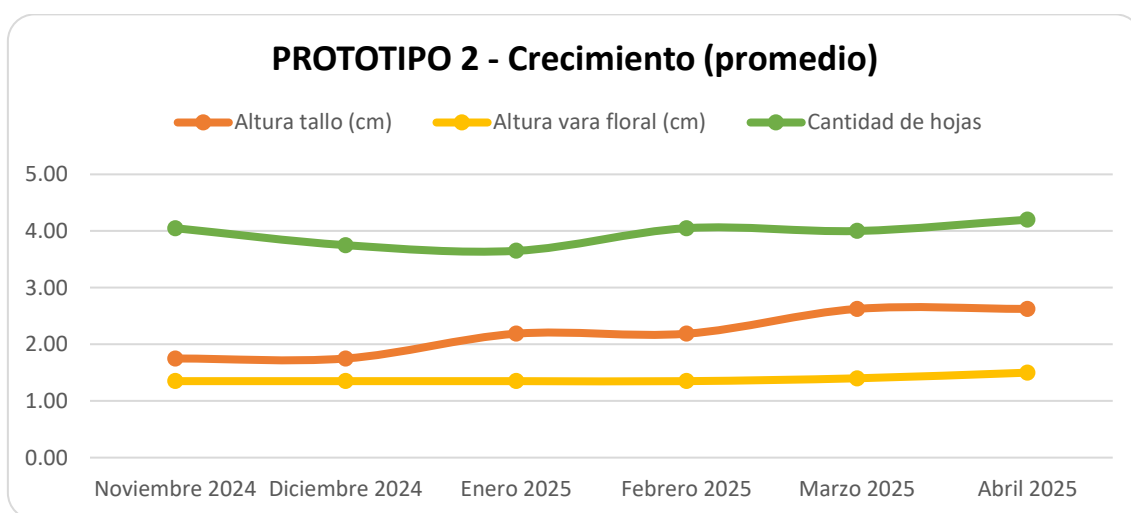


Fig. 44 Crecimiento de orquídeas – Prototipo 2

El Prototipo 2 evidencia ausencia de condición mala en hojas, raíz y salud, tal como se muestra en la figura 43, predominando la condición buena, con 70% en hojas, 75% en raíz y 55% en estado de salud, lo que indica un desempeño general favorable del cultivo a esta escala. Se observa una fracción en estado regular y una fracción de estado excelente que no es mayoritaria, aun así, el sistema mantiene estabilidad. En la Figura 44 se muestra un crecimiento promedio sostenido: la altura del tallo aumenta progresivamente hasta abril, la cantidad de hojas se mantiene estable, con una leve caída inicial y recuperación final y la vara floral permanece casi constante hasta febrero y presenta un incremento ligero en marzo–abril.

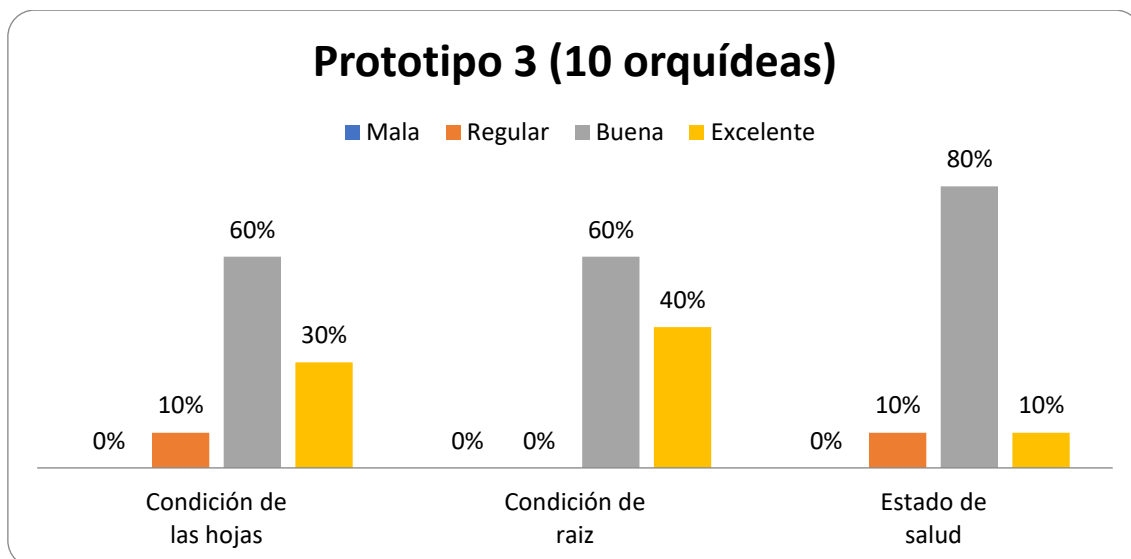


Fig. 45 Condiciones de salud de orquídeas – Prototipo 3

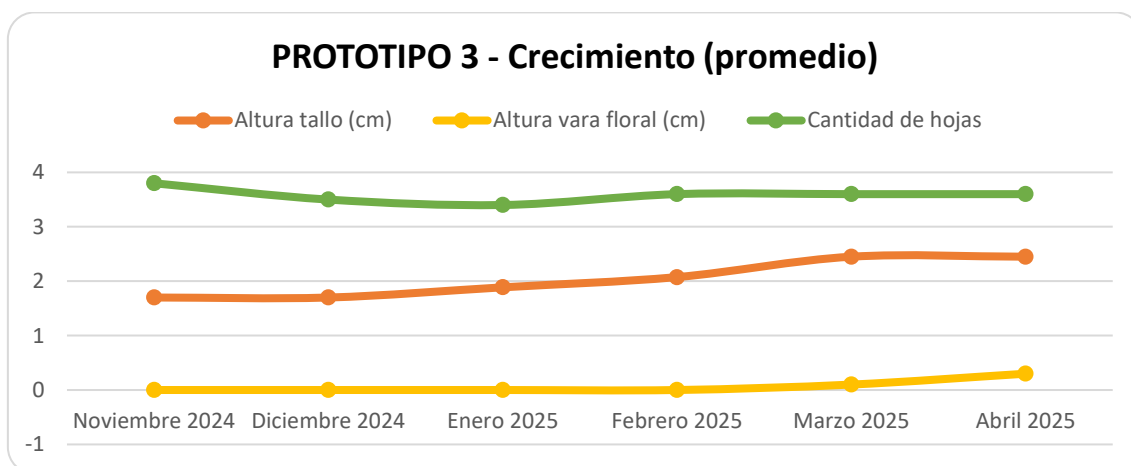


Fig. 46 Crecimiento de orquídeas – Prototipo 3

La Figura 45 evidencia un desempeño favorable del Prototipo 3, ya que no se registran casos en condición mala en hojas, raíz ni estado de salud, lo que sugiere ausencia de deterioro severo del cultivo bajo este esquema de riego. El componente más sólido es la condición de raíz, donde el 100% de las orquídeas se ubica entre buena (60%) y excelente (40%), sin presencia de condición regular; esto es consistente con un manejo hídrico que favorece un entorno radicular estable. La Figura 46 (Prototipo 3) evidencia un aumento sostenido de la altura del tallo hasta abril, mientras que la cantidad de hojas se mantiene estable con variaciones leves. La vara floral no se desarrolla hasta febrero y muestra un crecimiento incipiente en marzo–abril.

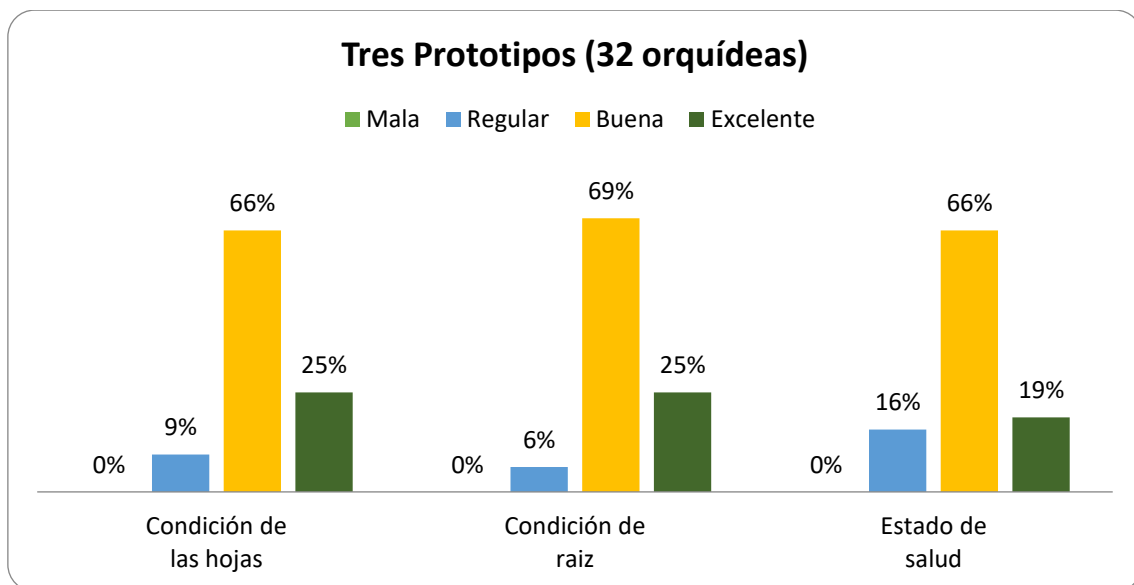


Fig. 47 Condiciones de salud de orquídeas – Tres prototipos

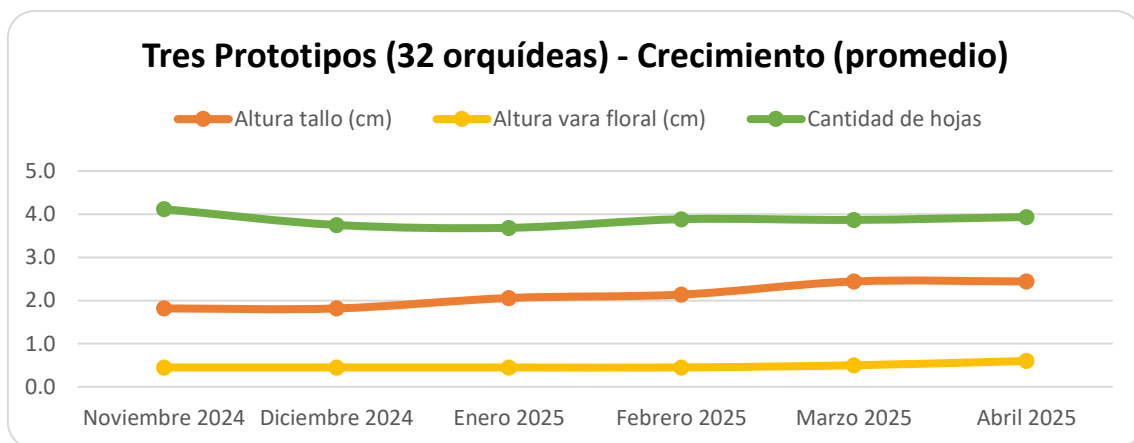


Fig. 48 Crecimiento de orquídeas – Tres prototipos

El comportamiento conjunto de los tres prototipos (32 orquídeas) y muestra un resultado global favorable, como se visualiza en la figura 47, no se registran casos en condición mala (0%) en hojas, raíz ni estado de salud, lo que sugiere ausencia de deterioro severo bajo los esquemas evaluados, prevaleciendo la condición buena en los tres indicadores (66% en hojas, 69% en raíz y 66% en salud), acompañada por una proporción excelente relevante (25% en hojas, 25% en raíz y 19% en salud). La principal oportunidad de mejora se concentra en el estado de salud, donde el porcentaje regular es el más alto (16%, frente a 9% en hojas y 6% en raíz), indicando que, aunque hojas y raíces se mantienen mayoritariamente en rangos adecuados.

La Figura 48 (tres prototipos, 32 orquídeas) resume el comportamiento promedio del cultivo entre noviembre 2024 y abril 2025 y evidencia un crecimiento vegetativo estable en el conjunto de orquídeas. La altura del tallo muestra un incremento sostenido a lo largo del periodo (≈ 1.8 cm a ≈ 2.4 cm), lo que indica desarrollo continuo bajo los esquemas de riego evaluados. La cantidad de hojas se mantiene prácticamente constante alrededor de 4 hojas, con una ligera disminución inicial (noviembre–enero) y recuperación posterior, sin señales de deterioro foliar progresivo. Por su parte, la vara floral permanece baja y casi constante durante los primeros meses, con un aumento leve hacia marzo–abril (≈ 0.5 a ≈ 0.6 cm), sugiriendo una aparición incipiente de desarrollo floral al final del seguimiento. En conjunto, el patrón observado es consistente con condiciones de riego que sostienen el crecimiento y estabilidad del cultivo, con limitada expresión floral en el periodo analizado.

Discusión de resultados

En relación con el objetivo general, los hallazgos de la investigación permiten concluir que, si bien el análisis identificó al Prototipo 3 como aquel que logra mejor regulación de humedad con dosificación más eficiente y sin aumento del consumo diario, los indicadores de control de humedad y eficiencia hídrica demostraron que el Prototipo 3 ofrece un desempeño más eficiente y sostenible, al optimizar el uso del agua y mantener condiciones estables para el cultivo de orquídeas en Cajamarca. Este resultado se vincula con lo planteado por Gonzales (2021), quien evidenció que los sistemas de riego automatizados basados en sensores de humedad promueven un uso racional del recurso hídrico y un desarrollo equilibrado de los cultivos, lo que coincide con la estabilidad observada en el Prototipo 3. Asimismo, Ramírez y Torres (2020) señalaron que la lógica difusa aplicada en sistemas inteligentes de riego garantiza un control preciso de variables, aunque puede generar desajustes que deriven en excesos de agua, limitación observada en el Prototipo 1, con mayor duración de cada sesión de riego. Por su parte, Huamán (2019) resaltó que la eficiencia hídrica es clave para la adopción de tecnologías agrícolas sostenibles, lo cual refleja la pertinencia del Prototipo 3 al equilibrar productividad y ahorro de agua.

En relación con el primer objetivo específico, que consistió en identificar los

componentes adecuados para la implementación del sistema inteligente de riego, se halló coherencia con el estudio de Chuga (2020) en Ecuador el cual demostró que la integración de sensores de humedad y temperatura, junto con la comunicación inalámbrica, optimiza los recursos y mejora la productividad agrícola. De forma similar, en este estudio se seleccionaron dispositivos como el microcontrolador ESP32, sensores de humedad, temperatura y flujo, así como módulos de alimentación y comunicación, demostrando su idoneidad por sus prestaciones técnicas y compatibilidad para el monitoreo y control en tiempo real.

Respecto al segundo objetivo específico, centrado en el diseño del sistema, se logró configurar una arquitectura que permite la gestión autónoma del riego mediante una lógica difusa. Esto se refleja en el uso de funciones de pertenencia que ajustan dinámicamente el tiempo de apertura de la válvula, aspecto que también fue abordado por Hidalgo y Tumbaco (2021), quienes implementaron un sistema de riego que responde a las condiciones ambientales mediante lógica difusa, permitiendo una toma de decisiones más contextual y eficaz. El diseño del presente estudio se caracterizó por una arquitectura modular con comunicación bidireccional, lo cual favorece tanto la autonomía del sistema como su capacidad de adaptación a entornos variables.

En cuanto al tercer objetivo específico, que fue determinar el comportamiento y funcionamiento del sistema, los resultados obtenidos evidencian un rendimiento sobresaliente en los tres prototipos evaluados. En el cultivo 1, el sistema mantuvo un 76 % del tiempo la humedad del suelo dentro del rango óptimo, con una eficiencia hídrica destacable (solo 4.14 L en seis meses) y una autonomía del 99.7 %. En el cultivo 2, la humedad se mantuvo dentro del rango óptimo el 74 % del tiempo, con un consumo de 29.64 L en el mismo periodo y una autonomía del 98.9 %. Finalmente, en el cultivo 3, la humedad se conservó óptima el 71 % del tiempo, con un consumo de 15.06 L y una autonomía del 99.9 %. Estos resultados son comparables a los hallados por Villazante (2020), quien, al implementar sistemas automatizados de riego en Bolivia, logró reducir el consumo de agua en un 27 %, demostrando que la automatización optimiza el uso hídrico sin comprometer la productividad. En el presente estudio, las eficiencias alcanzadas en los tres prototipos, junto con la mínima intervención

humana y la baja tasa de error, confirman que el sistema diseñado no solo mantiene la humedad dentro del rango óptimo, sino que también maximiza la autonomía y la fiabilidad operativa.

La investigación presentó limitaciones asociadas al contexto experimental y operativo del sistema: su implementación se realizó en un cultivo experimental de orquídeas que requirió suministro constante de agua mediante tuberías estándar para asegurar pruebas y calibraciones continuas, y además demandó conectividad a Internet para visualizar lecturas de sensores y ajustar parámetros de riego. Se identificó restricción de distancia de conexión de los sensores al microcontrolador (6 metros), así como actualización de versión de librerías que generaron cierta incompatibilidad con algunos sensores.

En el plano teórico, los resultados respaldan la premisa de que el riego debe ajustarse a la naturaleza y requerimientos del cultivo (orquídeas), aportando evidencia empírica de que el tipo de estrategia/implementación de riego se asocia a cambios relevantes en la humedad del sustrato (diferencias globales significativas), lo cual fortalece el cuerpo de conocimiento sobre sistemas de control inteligente con comunicación bidireccional aplicados a la administración del agua en agricultura. En el plano práctico, evidencia un control más fino de la humedad que contribuye a reducir el riesgo de déficit (marchitez/caída de hojas) y de exceso (daño radicular), al orientar decisiones de riego más consistentes con la necesidad real del cultivo. Metodológicamente, dado que los datos no siguieron distribución normal, se priorizó el contraste no paramétrico (Friedman y post hoc de Nemenyi), lo que refuerza la validez de las inferencias al emplear un enfoque robusto frente a la naturaleza de la muestra y al objetivo de comparar prototipos.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. Se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en la implementación del sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego orquídeas, específicamente en la humedad del sustrato entre prototipos (Friedman: $p < 0.0001$) y en segundos/maceta/día (Friedman $p = 0.027924$), mientras que no se evidenciaron diferencias globales en litros/maceta/día (Friedman $p = 0.101226$). El post-hoc (Nemenyi) confirmó diferencias en humedad a favor del prototipo 3 (P3) frente a prototipo 1 (P1) y prototipo 2 (P2), $p\text{-aj} < 0.0001$ en ambos pares, indicando que el sistema implementado en P3 logra cambios medibles en la humedad de sustrato sin incrementar el consumo diario normalizado por maceta y alcanzando un desarrollo adecuado de orquídeas.
2. Los componentes adecuados para el sistema permitieron un funcionamiento operativo con alta continuidad y estabilidad, reflejada en una autonomía de 99.7% (P1), 98.9% (P2) y 99.9% (P3), y en baja incidencia de fallas/confiabilidad operativa (0.6%, 0.7% y 0.1%, respectivamente), lo que sustenta que la identificación de componentes fue adecuada para sostener el control automático y el monitoreo requerido.
3. El diseño desarrollado logró que el sistema responda de forma consistente a condiciones del entorno, evidenciado por la adaptación ambiental de 90.5% (P1), 85.0% (P2) y 97.6% (P3), junto con un control de humedad sostenido en niveles altos (76%, 74% y 71%) dentro del rango objetivo. En línea con ello, la comparación inferencial muestra que, cuando se evalúa el resultado más crítico para la planta (humedad del sustrato), el “diseño + estrategia de riego” del Prototipo 3 se diferencia de manera marcada frente a P1 y P2 ($p < 0.0001$), por lo que el diseño no solo opera, sino que produce efectos medibles en la variable objetivo.
4. En la evaluación integral, los prototipos en condiciones extremas de eventos como sequía ($< 60\%$) entre 0.6% y 1.6% y exceso de humedad

(>80%) entre 0.6% y 2.1%, en el desarrollo del cultivo, se observó ausencia de condición “mala” en hojas/raíces/salud en los prototipos reportados: en el Prototipo 2 predominó condición buena (55% hojas; 75% raíz; 50% salud) y el resto se distribuyó entre regular y excelente; y en el Prototipo 3 la raíz se mantuvo 100% entre buena y excelente (60%–40%), lo que es consistente con un entorno radicular estable bajo el manejo hídrico aplicado.

5.2 Recomendaciones

1. A los productores de orquídeas en Cajamarca y responsables de gestión hídrica que desarrollen sistemas similares, se recomienda priorizar la adopción del enfoque/prototipo que demostró diferencias favorables en humedad del sustrato (diferencias globales significativas y post hoc con $p < 0.0001$), implementándolo con un plan mínimo de operación que asegure conectividad y registro continuo, ya que el principal beneficio observado se expresa en la variable agronómica crítica (humedad), sin evidencia de diferencias globales en consumo hídrico diario ($p = 0.101$).
2. Se recomienda a los estudiantes/investigadores y equipos técnicos de implementación que la selección de componentes se replique manteniendo como criterio técnico los niveles observados de autonomía ($\geq 98.9\%$) y confiabilidad operativa ($\leq 0.7\%$), incorporando desde el inicio un plan de abastecimiento y pruebas de compatibilidad para mitigar el riesgo de equipos costosos/difíciles de conseguir o no conformes al requerimiento.
3. A los desarrolladores del software/aplicación y diseñadores de arquitectura IoT, se recomienda fortalecer el diseño del sistema manteniendo como indicador de desempeño la adaptación ambiental (hasta 97.6%) y el control de humedad (71%–76%), e incorporando validaciones de extremo a extremo (sensado–decisión–actuación–visualización) orientadas a sostener las diferencias de desempeño verificadas por Friedman/Nemenyi en humedad ($p < 0.0001$).
4. A los responsables de operación/mantenimiento del sistema y futuros investigadores se sugiere institucionalizar una rutina de evaluación

periódica que monitoree, como mínimo, autonomía, eventos de sequía/exceso y humedad del sustrato, usando contrastes no paramétricos cuando aplique (datos no normales), para asegurar que el comportamiento integral se mantenga dentro de los rangos observados (autonomía 98.9%–99.9%; sequía $\leq 1.5\%$; exceso $\leq 0.9\%$) y que la mejora/diferenciación de humedad se sostenga en el tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Organismo Internacional de Energía Atómica, «Agua». Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/agua>
- [2] World Economic Forum, «Este modelo innovador ayuda a mejorar la seguridad hídrica en América Latina», Foro Económico Mundial. Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.weforum.org/agenda/2023/04/este-innovador-modelo-une-a-empresas-y-agricultores-para-mejorar-la-seguridad-hidrica-en-america-latina/>
- [3] Provides infrastructure, procurement and project management services to help build the future., «Lucha contra la escasez de agua en el Perú». Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unops.org/>
- [4] J. Pizarro, «Tecnología, la clave para el impulso de la agricultura peruana 4.0 | Conexión ESAN». Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/tecnologia-la-clave-para-el-impulso-de-la-agricultura-peruana-4-0>
- [5] «Productores Agropecuarios - Principales Resultados de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), 2018-2019 y 2022-2024». Accedido: 22 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/6879473-productores-agropecuarios-principales-resultados-de-la-encuesta-nacional-agropecuaria-ena-2018-2019-y-2022-2024>
- [6] «Cajamarca: 92% de la agricultura es de subsistencia y no tiene acceso a financiamiento ni tecnología - PERUMIN». Accedido: 22 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://perumin.com/perumin35/public/es/noticia/cajamarca-92-de-la-agricultura-es-de-subsistencia-y-no-tiene-acceso-a-financiamiento-ni-tecnologia>
- [7] «ISO/IEC 42001:2023(en), Information technology — Artificial intelligence — Management system». Accedido: 1 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-iec:42001:ed-1:v1:en>
- [8] M. A. Chugá, «Diseño e implementación de un sistema de riego inteligente y monitoreo de variables edafológicas y meteorológicas activado por IOT», oct. 2022, Accedido: 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4876>
- [9] D. Villazante, «DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO AUTÓNOMO E INTELIGENTE CON CAPACIDAD DE MONITOREAR VARIABLES CLIMÁTICAS», 2022, [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/31500/T->

- 3113.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] B. G. Hidalgo Aguaisa y C. V. Tumbaco Sango, «Prototipo de riego automatizado para la producción de rosas usando la lógica difusa.», ago. 2021, Accedido: 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8779>
 - [11] R. E. Barramuño, «SISTEMA AUTOMATIZADO PARA RIEGO EN HUERTOS URBANOS Y PLANTAS». Accedido: 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.usm.cl/bitstreams/0c17b9e7-bbd9-4ceb-9d85-da9e2debb728/download>
 - [12] P. A. Carrillo Pasiche y A. Miranda Gutarra, «Sistema de riego inteligente y ecológico para las áreas verdes en Lima Metropolitana utilizando IoT», Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, 2023. Accedido: 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10757/672045>
 - [13] K. A. Lara, «Diseño e implementación de un sistema de control microclimático para la preservación de orquídeas endémicas del Perú en invernadero». Accedido: 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7910>
 - [14] C. J. Julca y G. Leyva, «Prototipo de sistema de riego automático para la conservación de áreas verdes de la Plaza Cívica – J.L.O». [En línea]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UPRG_115728925bb99de66b8a1117fcb8b6fa/Details
 - [15] G. M. Chávez Cancha, «Riego automatizado empleando tecnología arduino para distribución del recurso hídrico en áreas de cultivo. caserío Sacuayoc-Yungay. 2018», *Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo*, 2018, Accedido: 30 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2473>
 - [16] sergio Ríos, «ntroducción al Control Automático». Accedido: 31 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ocw.ehu.eus/file.php/83/cap1_html/introduccion-al-control-automatgico.html
 - [17] C. Parra, «Análisis del algoritmo red con la teoría de control moderna», *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 25, n.º 1, pp. 53-60, mar. 2010.
 - [18] O. G. Duarte Velasco, «Sistemas de lógica difusa: fundamentos», *Ingeniería e Investigación*, n.º 42, pp. 22-30, 1999.
 - [19] M. D. Arango Serna, C. A. Urán Serna, y G. Pérez-Ortega, «Aplicaciones de lógica difusa a las cadenas de suministro», 2008, Accedido: 1 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/24454>
 - [20] «ISO 9000:2015(es), Sistemas de gestión de la calidad — Fundamentos y vocabulario». Accedido: 28 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es>

- [21] C. E. Maldonado, «¿Qué es un sistema complejo?», *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, vol. 14, n.º 29, pp. 71-93, 2014.
- [22] J. E. Bohórquez, «La teoría general de sistemas», *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, vol. 4, n.º 1-2, pp. 111-137, 1993.
- [23] R. E. Haber Guerra, J. R. Alique, J. Dorronsoro, y R. Galán López, «Sistemas de Control Inteligente: Tendencia Actual y Desarrollos Futuros», en *Actas II Convención Internacional de la Ingeniería | VI Conferencia de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) | 3 al 5 de febrero del 2010 | Cuba*, Cuba: E.T.S.I. Industriales (UPM), 2010. Accedido: 2 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/54638/>
- [24] D. A. Jaramillo Chamba et al., «Sistema de riego inteligente para el mantenimiento de áreas verdes en una institución educativa», *Revista Científica y Tecnológica UPSE (RCTU)*, vol. 10, n.º 2, pp. 50-63, dic. 2023, doi: 10.26423/rctu.v10i2.740.
- [25] J. P. Miquel y J. A. R. Martos, «Introducción a la ingeniería del software», *Universidad Oberta de Catalunya*, Accedido: 28 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/fab2269c-d5ae-4e93-934a-b0d91601d0f7/content>
- [26] W. Fernández R. y A. Rodríguez R., «OFDM óptimo para la comunicación bidireccional en las redes eléctricas inteligentes», *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, n.º 1, pp. 43-53, mar. 2018, doi: 10.4067/S0718-33052018000100043.
- [27] W. R. Walker y G. V. Skogerboe, *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Prentice-Hall, 1987.
- [28] C. Crespo, «Apuntes y conceptos básicos sobre riego y drenaje», PortalFruticola.com. Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/08/24/apuntes-completos-de-la-materia-de-riego-y-drenaje-conceptos-basicos-libro-en-pdf/>
- [29] C. Chávez, C. Fuentes, y E. Ventura Ramos, «Uso eficiente del agua de riego por gravedad utilizando yeso y poliacrilamida», *Terra Latinoamericana*, vol. 28, n.º 3, pp. 231-238, sep. 2010.
- [30] M. López-Silva et al., «Criterios de eficiencia para la evaluación del riego por aspersión», *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 28, n.º 3, sep. 2019, Accedido: 3 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542019000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [31] J. R. Méndez-Natera, L. Lara, y J. A. Gil-Marín, «EFECTO DEL RIEGO POR GOTEO EN EL CRECIMIENTO INICIAL DE TRES CULTIVARES DE ALGODÓN (GOSSYPIUM HIRSUTUM L.)», *Idesia (Arica)*, vol. 25, n.º 2,

- pp. 7-15, ago. 2007, doi: 10.4067/S0718-34292007000200002.
- [32] P. R. Alcocer Quinteros, M. Calero Zurita, N. Cedeño Zambrano, y E. Lapo Manchay, «Automatización de los procesos industriales», *Journal of business and entrepreneurial studies: JBES*, vol. 4, n.º 2, pp. 123-131, 2020.
- [33] F. R. Dungan, *Sistemas electrónicos de telecomunicación: electrónica de los sistemas, técnicas y circuitos, técnicas de modulación analógicas y digitales, líneas de transmisión, ondas de radio, propagación, antenas*. Thomson-Paraninfo, 1996. Accedido: 11 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=239606>
- [34] Á. A. Custodio Ruiz y R. Torres, «Conexión directa de múltiples sensores a microcontroladores sin utilizar convertidor analógico digital», *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 10, n.º 39, pp. 147-151, jul. 2006.
- [35] B. Sánchez y J. Fonseca, «Algoritmos como herramienta en la búsqueda de nuevos datos para la resolución de problemas sobre isometrías del plano». Accedido: 11 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-38142012000200002
- [36] T. Burstein-Roda, «Reflexiones sobre la gestión de los recursos hídricos y la salud pública en el Perú», *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, vol. 35, n.º 2, pp. 297-303, abr. 2018, doi: 10.17843/rpmesp.2018.352.3641.
- [37] L. E. Sanchez Arzapalo y A. D. P. M. Acosta Sanchez, «Optimización del consumo de agua agrícola en Lima: Buenas prácticas y métodos de riego eficientes», *revistaalfa*, vol. 7, n.º 20, pp. 464-473, may 2023, doi: 10.33996/revistaalfa.v7i20.229.
- [38] D. S. Galindo Araque, M. C. Vargas Sarmiento, y J. P. Corredor, «Caracterización de Temperatura y Humedad de Suelos Agrícolas», *Letras ConCiencia TecnoLógica*, n.º 16, pp. 24-31, 2017.
- [39] R. Radulovich, «Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo», *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas*, vol. 33, n.º 1, pp. 121-124, 2009.
- [40] «ISO/IEC 30141:2024 - Internet of Things (IoT) — Reference architecture». Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/88800.html>
- [41] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, y P. Lorenz, «IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture», *Sensors*, vol. 20, n.º 4, feb. 2020, doi: 10.3390/s20041042.
- [42] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, y M. Palaniswami, «Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions», *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, n.º 7, pp. 1645-1660, sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [43] J. Voas, «Networks of “Things”», National Institute of Standards and

- Technology, NIST Special Publication (SP) 800-183, jul. 2016. doi: 10.6028/NIST.SP.800-183.
- [44] «Lee and Seshia, Introduction to Embedded Systems». Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ptolemy.berkeley.edu/books/leeseshia/>
- [45] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, y L. Xu, «Edge Computing: Vision and Challenges», *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, n.º 5, pp. 637-646, oct. 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
- [46] R. T. Fielding, M. Nottingham, y J. Reschke, «HTTP Semantics», Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 9110, jun. 2022. doi: 10.17487/RFC9110.
- [47] E. Rescorla, «The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3», Internet Engineering Task Force, Request for Comments RFC 8446, ago. 2018. doi: 10.17487/RFC8446.
- [48] R. Ventura Palomino y F. A. Lima Esperilla, «Diseño de un sistema automatizado de riego por aspersión con generación fotovoltaica para optimizar el consumo del recurso hídrico en un terreno de cultivo de aguaymanto en el CPM de Mayobamba-2022», *Universidad Continental*, 2024, Accedido: 16 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14202>
- [49] Google Maps, «Localización Alfonso UgarteGoogle Maps», Google Maps. Accedido: 16 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com.pe/maps/place/Alfonso+Ugarte+360,+Bambamarca+06115/@-6.688887,-78.5196174,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x91b3a377f6a4cc15:0x21356a9efb2e2d31!8m2!3d-6.688887!4d-78.5196174?hl=es-419&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTAxNS4wKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- [50] «ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC», Espressif Systems. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>
- [51] «Firebase Realtime Database», Firebase. Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://firebase.google.com/docs/database?hl=es-419>
- [52] G. P. Pereira, M. Z. Chaari, y F. Daroge, «IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32», *IoT*, vol. 4, n.º 3, pp. 221-243, jul. 2023, doi: 10.3390/iot4030012.
- [53] A. Hevner, S. March, J. Park, y S. Ram, «Design Science in Information Systems Research», *Management Information Systems Quarterly*, vol. 28, n.º 1, dic. 2008, [En línea]. Disponible en: <https://aisel.aisnet.org/misq/vol28/iss1/6>
- [54] «A Design Science Research Methodology for Information Systems Research: Journal of Management Information Systems: Vol 24, No 3». Accedido: 3 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2753/MIS0742-1222240302>

- [55] P. Checkland, «Systems Thinking, Systems Practice: Includes a 30-Year Retrospective | Wiley», Wiley.com. Accedido: 14 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Systems+Thinking%2C+Systems+Practice%3A+Includes+a+30-Year+Retrospective-p-9780471986065>
- [56] C. M. Duran Acevedo, «Diseño y optimización de los subsistemas de un sistema de olfato electrónico para aplicaciones agroalimentarias e industriales», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universitat Rovira i Virgili, 2006. Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=8230>
- [57] R. J. Martelo, L. C. Tovar, D. A. Maza, R. J. Martelo, L. C. Tovar, y D. A. Maza, «Modelo Básico de Seguridad Lógica. Caso de Estudio: el Laboratorio de Redes de la Universidad de Cartagena en Colombia», *Información tecnológica*, vol. 29, n.º 1, pp. 3-10, feb. 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000100003.
- [58] K. Ramírez-Acosta, «Interfaz y experiencia de usuario: parámetros importantes para un diseño efectivo», *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 30, pp. 49-54, dic. 2017, doi: 10.18845/tm.v30i5.3223.
- [59] J. E. Gaitan Pitre, «Interfaces directas entre sensores capacitivos y microcontrolador», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2019. Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=258354>
- [60] Luis Zarzosa, D. Parrés, y E. Guarneros, «Efectividad de una interfaz para lectura estratégica en estudiantes universitarios». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/2389031>
- [61] J. Puerto, «Análisis del diseño de interfaces gráficas de usuario para el control y monitorización de sistemas optoelectrónicos aplicados a telecomunicaciones e instrumentación electrónica». Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-83672022000100033&script=sci_arttext
- [62] J. Maldonado, «La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2023000100140&script=sci_abstract&tIng=es
- [63] S. Romero y J. Quintero Mendoza, «Nivel de conocimiento en programación y el desarrollo de sistemas de información automatizados», *TECHNO REVIEW: International Technology, Science and Society Review / Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, vol. 3, n.º 2, p. 5, 2014.
- [64] C. Manterola, «Estudios de Corte Transversal. Un Diseño de Investigación a Considerar en Ciencias Morfológicas». Accedido: 9 de septiembre de

2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022023000100146
- [65] J. Arnau Gras, «Los diseños experimentales en psicología», *Anuario de psicología*, n.º 12, pp. 3-50, 1975.
 - [66] P. L. López, «POBLACIÓN MUESTRA Y MUESTREO», *Punto Cero*, vol. 09, n.º 08, pp. 69-74, 2004.
 - [67] J. Sarasola, «Unidad de análisis - definición y noticias relacionadas - Ikusmira». Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ikusmira.org/p/unidad-de-analisis>
 - [68] A. Mora Villate, «Descripción de los sistemas de control digital de procesos», *Ingeniería e Investigación*, n.º 13, pp. 55-60, 1986.
 - [69] L. A. Gurovich y I. I. de C. para la Agricultura (IICA), «Fundamentos y diseño de sistemas de riego», 1985, Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/7213>
 - [70] C. Beltrán Bermúdez, «El mundo de las ciencias de la complejidad», *Innovar*, vol. 22, n.º 45, pp. 157-159, jul. 2012.
 - [71] J. Gonzales y M. Covinos, *DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN*. 2021.
 - [72] G. Montes, «METODOLOGÍA Y TECNICAS DE DISEÑO Y REALIZACIÓN DE ENCUESTAS EN EL AREA RURAL», *Temas Sociales*, n.º 21, pp. 39-50, 2000.
 - [73] J. Z. Zambrano, M. Loachamín-Marcillo, M. Pilco-Gallegos, y W. J. Pilco-Gallegos, «Cuestionario para medir la importancia y satisfacción de los servicios universitarios desde la perspectiva estudiantil», *Revista Ciencia Unemi*, vol. 12, n.º 30, pp. 35-45, 2019.
 - [74] V. H. A. Castillo, «Metodología de la Investigación, El método Arias», *Metodología de la investigación: El método ARIAS para realizar un proyecto de tesis*, ene. 2022, Accedido: 4 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en:
https://www.academia.edu/94853051/Metodolog%C3%ADa_de_la_Investigaci%C3%B3n_El_m%C3%A9todo_Arias
 - [75] M. Useche, W. Artigas, Q. Beatriz, y E. Perozo, *Técnicas e instrumentos de recolección de datos Cualit-Cuantitativos*. 2020.
 - [76] V. Cuauhtémoc, «Estadística descriptiva y selección de la prueba». Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-21982014000200009
 - [77] «Fuzzy sets», *Information and Control*, vol. 8, n.º 3, pp. 338-353, jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
 - [78] Dominguez, «Guía completa para un riego correcto», Orquídeas Las Mesas. Accedido: 19 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://viverosorquideaslasmesas.es/regar-orquideas-guia-completa-para-un-riego-correcto/>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Formulación de problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Dimensión	Indicadores	Instrumentos	Metodología
Problema general ¿Cómo influye la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca? Problemas específicos • ¿Cuáles son los componentes tecnológicos adecuados a utilizar en el sistema inteligente? • ¿Cuál es el diseño apropiado para el desarrollo del sistema inteligente? • ¿Cuál es el comportamiento y funcionamiento integral del sistema?	Objetivo General Determinar la influencia de la implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca. Objetivos específicos • Identificar los componentes tecnológicos adecuados a utilizar en el sistema inteligente. • Realizar el diseño apropiado para el desarrollo del sistema inteligente. • Evaluar el comportamiento y funcionamiento integral del sistema	Hipótesis general La implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional influye significativamente en la administración del riego de un cultivo de orquídeas en la ciudad de Cajamarca. Hipótesis específicas • (Objetivo técnico, no requiere hipótesis estadística). • (Objetivo técnico, no requiere hipótesis estadística). • Evaluar el comportamiento y funcionamiento integral del sistema permite identificar diferencias significativas de humedad del sustrato, consumo de agua y tiempo de riego entre los prototipos.	Independiente Sistema de control inteligente con comunicación bidireccional	Comunicación bidireccional	- Capacidad de intercambio bidireccional exitosa entre aplicación móvil y sistema de control (lecturas enviadas desde el sistema y parámetros recibidos desde la aplicación). - Fluidez de la comunicación entre sistema y usuario (actualización de datos de 6 a 10 segundos). - Capacidad de supervisión y corrección del funcionamiento del sistema ante posibles fallas.	Ficha de inspección, registros temporales, ficha de cotejo	Tipo de Investigación: aplicada. Alcance: explicativo. Diseño: cuasi experimental comparativo. Estadística descriptiva e inferencial, prueba Friedman (χ^2) Muestra: tres cultivos de orquídeas de la ciudad de Cajamarca.
				Adaptabilidad del sistema	- Capacidad de ajuste de parámetros de usuario (tiempo de riego y humedad de sustrato) según condiciones del cultivo (0.3 a 0.7 segundos). - Respuesta del sistema ante variaciones de las variables de entrada (1 a 11 segundos en recalcular valores).		
				Estabilidad operativa	- Estabilidad operativa del sistema de control inteligente durante funcionamiento continuo. - Porcentaje de autonomía del sistema (%). - Tasa de error en el funcionamiento del sistema (%).		
			Dependiente Administración del riego de un cultivo de orquídeas	Regulación de la humedad del sustrato	- Humedad promedio del sustrato (%) - Humedad fuera del rango óptimo (<60% y >80%).		
				Consumo de agua	- Consumo total de agua por prototipo (L). - Consumo medio de agua por maceta (L).		
				Tiempo de riego	- Duración promedio de los eventos de riego (segundos) - Frecuencia de activación del riego (pulsos).		
				Desarrollo saludable de las Orquídeas	- Crecimiento medio de tallo de orquídea (cm). - Crecimiento medio de vara floral de orquídea (cm). - Cantidad media de hojas por orquídea. - Condición de las hojas de orquídea (escala de 1 a 4). - Condición de la raíz de orquídea (escala de 1 a 4).		

Anexo 2: Ficha de inspección

SISTEMA DE CONTROL INTELIGENTE CON COMUNICACIÓN BIDIRECCIONAL

Verifica las condiciones enfocadas a cada indicador, para lo cual se debe tener en cuenta la siguiente codificación:

Malo: 1 Regular: 2 Bueno: 3 Excelente: 4

Condiciones a verificar			
1	Comunicación bidireccional	Calificación	Observaciones
	Capacidad de intercambio bidireccional exitosa entre aplicación móvil y sistema de control (lecturas enviadas desde el sistema y parámetros recibidos desde la aplicación)		
	Fluidez de la comunicación entre sistema y usuario (actualización de datos de 6 a 10 segundos).		
	Capacidad de supervisión y corrección del funcionamiento del sistema ante posibles fallas.		
2	Adaptabilidad	Calificación	Observaciones
	Capacidad de ajuste de parámetros de usuario (tiempo de riego y humedad de sustrato) según condiciones del cultivo (0.5 segundos para actualizar parámetros).		
	Respuesta del sistema ante variaciones de las variables de entrada (9 segundos en recalcular valores).		
2	Estabilidad operativa	Calificación	Observaciones
	Estabilidad operativa del sistema de control inteligente durante funcionamiento continuo.		
	Porcentaje de autonomía del sistema (%).		
	Tasa de error en el funcionamiento del sistema (%)		
Experto:			
Aprobó:			
Fecha:			

Anexo 3: Ficha de registros temporales

[illegible]

Anexo 4: Ficha de Cotejo

Observador: _____

Variable/Indicador	Unidad de medida	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Promedio
Dimensión 1: Regulación de la humedad del sustrato								
Humedad promedio del sustrato	Porcentaje							
Humedad fuera del rango óptimo (<60% y >80%).	Cantidad de registros							
Dimensión 2: Consumo de agua								
Consumo total de agua por prototipo	Litros							
Consumo medio de agua por maceta	Litros							
Dimensión 3: Tiempo de riego								
Duración promedio de los eventos de riego	Segundos							
Frecuencia de activación del riego	Ciclos por horas							
Dimensión 5: Desarrollo y crecimiento de las Orquídeas								
Crecimiento medio de tallo de orquídea	Centímetros							
Crecimiento medio de vara floral de orquídea	Centímetros							
Cantidad media de hojas por orquídea	Unidades							
Condición de las hojas de orquídea	1: Malo 2: Regular 3: Bueno 4: Excelente							
Condición de la raíz de orquídea	1: Malo 2: Regular 3: Bueno 4: Excelente							

Anexo 5: Validación de Ficha de inspección



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

FICHA DE EVALUACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

I. Datos Generales:

Apellidos y nombres del experto: Llanos Bardales Jaime, Dr. Ing.

Nombre del instrumento: Ficha de inspección

Autor del Instrumento: Jorge Luis Chicoma Gamarra

Título de la Investigación: Implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional para la administración del riego de un cultivo de Orquídeas en la ciudad de Cajamarca.

Items (criterio de validación: claridad, objetivo, pertinencia)

Variable	Dimensión	N°	Indicadores	CRITERIO DE EVALUACIÓN			
				Claridad	Relevancia	Coherencia	Observaciones
Sistema de control inteligente bidireccional	Comunicación bidireccional	1	- Capacidad de intercambio bidireccional exitosa entre aplicación móvil y sistema de control (lecturas enviadas desde el sistema y parámetros recibidos desde la aplicación)	4	3	3	
		2	- Fluidez de la comunicación entre sistema y usuario (actualización de datos de 6 a 10 segundos).	4	4	3	
		3	- Capacidad de supervisión y corrección del funcionamiento del sistema ante posibles fallas.	4	4	4	
	Adaptabilidad	4	- Capacidad de ajuste de parámetros de usuario (tiempo de riego y humedad de sustrato) según condiciones del cultivo (0.3 a 0.7 segundos).	4	4	3	
		5	- Respuesta del sistema ante variaciones de las variables de entrada (1 a 11 segundos en recalcular valores).	4	4	3	
	Estabilidad operativa	6	- Estabilidad operativa del sistema de control inteligente durante funcionamiento continuo.	4	3	4	
		7	- Porcentaje de autonomía del sistema (%).	4	3	3	
		8	- Tasa de error en el funcionamiento del sistema (%)	4	4	3	

Criterios para evaluar los indicadores

- 1. Claridad:** Evalúa si el indicador es comprensible y está formulado de manera precisa y sin ambigüedades.
- 2. Relevancia:** Determina si el indicador es pertinente y adecuado para medir la variable y dimensión correspondiente.
- 3. Coherencia:** Verifica si el indicador está alineado con los objetivos de la investigación y el contexto del estudio.

Valores de evaluación para los criterios de Claridad, Relevancia y Coherencia:

Malo: 1 Regular: 2 Bueno: 3 Excelente: 4

Juicio de experto respecto a la prueba:

Válido (X) Por mejorar () No válido ()

Lugar y fecha: Cajamarca, 28 Febrero de 2026


Firma del experto



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

FICHA DE EVALUACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

I. Datos Generales:

Apellidos y nombres del experto: Llanos Bardales Jaime, Dr. Ing.

Nombre del instrumento: Ficha de Cotejo

Autor del Instrumento: Jorge Luis Chicoma Gamarra

Título de la Investigación: Implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional para la administración del riego de un cultivo de Orquídeas en la ciudad de Cajamarca.

Items (criterio de validación: claridad, objetivo, pertinencia)

Variable	Dimensión	Nº	Indicadores	CRITERIO DE EVALUACIÓN			
				Claridad	Relevancia	Coherencia	Observaciones
Administración del riego de un cultivo de Orquídeas	Regulación de la humedad del sustrato	1	- Humedad promedio del sustrato (%)	4	4	4	
		2	- Humedad fuera del rango óptimo (<60% y >80%).	4	4	3	
	Consumo de agua	3	- Consumo total de agua por prototipo (L.).	4	4	4	
		4	- Consumo medio de agua por maceta (L.).	4	4	4	
	Tiempo de riego	5	- Duración promedio de los eventos de riego (seg).	4	4	4	
		6	- Frecuencia de activación del riego (pulsos).	4	4	3	
	Desarrollo y crecimiento de las Orquídeas	7	- Crecimiento medio de tallo de orquídea (cm).	4	4	4	
		8	- Crecimiento medio de vara floral de orquídea (cm)	4	4	4	
		9	- Cantidad media de hojas por orquídea.	4	4	4	
		10	- Condición de las hojas de orquídea (escala de 1 a 4)	4	4	4	
		11	- Condición de la raíz de orquídea (escala de 1 a 4)	4	4	4	

Criterios para evaluar los indicadores

4. **Claridad:** Evalúa si el indicador es comprensible y está formulado de manera precisa y sin ambigüedades.
5. **Relevancia:** Determina si el indicador es pertinente y adecuado para medir la variable y dimensión correspondiente.
6. **Coherencia:** Verifica si el indicador está alineado con los objetivos de la investigación y el contexto del estudio.

Valores de evaluación para los criterios de Claridad, Relevancia y Coherencia:

Malo: 1 Regular: 2 Bueno: 3 Excelente: 4

Juicio de experto respecto a la prueba:

Válido (X) Por mejorar () No válido ()

Lugar y fecha: Cajamarca, 28 Febrero de 2026

 Firma del experto

Anexo 6: Validación de Ficha de inspección – experto agrónomo



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS**

FICHA DE EVALUACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

I. Datos Generales:

Apellidos y nombres del experto: MSc. Ing. Elfer Neira Huamán

Nombre del instrumento: Ficha de inspección

Autor del Instrumento: Jorge Luis Chicoma Gamarra

Título de la Investigación: Implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional para la administración del riego de un cultivo de Orquídeas en la ciudad de Cajamarca.

Items (criterio de validación: claridad, objetivo, pertinencia)

Variable	Dimensión	Nº	Indicadores	CRITERIO DE EVALUACIÓN			
				Claridad	Relevancia	Coherencia	Observaciones
Sistema de control inteligente bidireccional	Comunicación bidireccional	1	- Capacidad de intercambio bidireccional exitosa entre aplicación móvil y sistema de control (lecturas enviadas desde el sistema y parámetros recibidos desde la aplicación)	4	3	4	
		2	- Fluidez de la comunicación entre sistema y usuario (actualización de datos de 6 a 10 segundos).	4	4	4	
		3	- Capacidad de supervisión y corrección del funcionamiento del sistema ante posibles fallas.	4	4	3	
	Adaptabilidad	4	- Capacidad de ajuste de parámetros de usuario (tiempo de riego y humedad de sustrato) según condiciones del cultivo (0.3 a 0.7 segundos).	4	3	4	
		5	- Respuesta del sistema ante variaciones de las variables de entrada (1 a 11 segundos en recalcular valores).	4	4	3	
	Estabilidad operativa	6	- Estabilidad operativa del sistema de control inteligente durante funcionamiento continuo.	4	4	3	
		7	- Porcentaje de autonomía del sistema (%).	4	4	4	
		8	- Tasa de error en el funcionamiento del sistema (%)	4	4	4	

Criterios para evaluar los indicadores

- 1. Claridad:** Evalúa si el indicador es comprensible y está formulado de manera precisa y sin ambigüedades.
- 2. Relevancia:** Determina si el indicador es pertinente y adecuado para medir la variable y dimensión correspondiente.
- 3. Coherencia:** Verifica si el indicador está alineado con los objetivos de la investigación y el contexto del estudio.

Valores de evaluación para los criterios de Claridad, Relevancia y Coherencia:

Malo: 1 Regular: 2 Bueno: 3 Excelente: 4

Juicio de experto respecto a la prueba:

Válido (X) Por mejorar () No válido ()

Lugar y fecha: *Cajamarca, 03 de Marzo de 2026*

Firma del experto



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

FICHA DE EVALUACIÓN DE INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

I. Datos Generales:

Apellidos y nombres del experto: MSc. Ing. Elfer Neira Huamán

Nombre del instrumento: Ficha de Cotejo

Autor del Instrumento: Jorge Luis Chicoma Gamarra

Título de la Investigación: Implementación de un sistema de control inteligente con comunicación bidireccional para la administración del riego de un cultivo de Orquideas en la ciudad de Cajamarca.

Items (criterio de validación: claridad, objetivo, pertinencia)

Variable	Dimensión	Nº	Indicadores	CRITERIO DE EVALUACIÓN			
				Claridad	Relevancia	Coherencia	Observaciones
Administración del riego de un cultivo de Orquideas	Regulación de la humedad del sustrato	1	- Humedad promedio del sustrato (%)	4	4	3	
		2	- Humedad fuera del rango óptimo (<60% y >80%).	4	3	4	
	Consumo de agua	3	- Consumo total de agua por prototipo (L).	4	4	4	
		4	- Consumo medio de agua por maceta (L).	4	4	4	
	Tiempo de riego	5	- Duración promedio de los eventos de riego (seg).	4	4	3	
		6	- Frecuencia de activación del riego (pulsos).	4	3	4	
	Desarrollo y crecimiento de las Orquideas	7	- Crecimiento medio de tallo de orquídea (cm).	4	4	4	
		8	- Crecimiento medio de vara floral de orquídea (cm)	4	4	4	
		9	- Cantidad media de hojas por orquídea.	4	4	4	
		10	- Condición de las hojas de orquídea (escala de 1 a 4)	4	4	4	
		11	- Condición de la raíz de orquídea (escala de 1 a 4)	4	4	4	

Criterios para evaluar los indicadores

4. **Claridad:** Evalúa si el indicador es comprensible y está formulado de manera precisa y sin ambigüedades.
5. **Relevancia:** Determina si el indicador es pertinente y adecuado para medir la variable y dimensión correspondiente.
6. **Coherencia:** Verifica si el indicador está alineado con los objetivos de la investigación y el contexto del estudio.

Valores de evaluación para los criterios de Claridad, Relevancia y Coherencia:

Malo: 1 Regular: 2 Bueno: 3 Excelente: 4

Juicio de experto respecto a la prueba:

Válido (X) Por mejorar () No válido ()

Lugar y fecha: *Cajamarca, 03 de Marzo de 2026*

Firma del experto

Anexo 7: Muestra de Datos del prototipo 1 (2 macetas – riego por micro goteo)

Air Temperature	DateLoadAt	Message Status	MinSoil MoisturePercent	Relative Humidity	SoilMoisture Percent	Soil Temperature	Time ValveOn	TimeValve TurnedOn	Valve Status	Volume
20.2	2024-10-26T21:22:36.027329-05:00	All is Ok	60	63.2	75.42857	20.5	6	0	OFF	0
20.1	2024-10-26T21:26:46.032958-05:00	All is Ok	60	63.5	79.38095	20.5	6	0	OFF	0
19.4	2024-10-26T23:07:28.012302-05:00	First Load	60	63.5	74.2381	19.6875	6	0	OFF	0
18.6	2024-10-27T01:07:31.7214589-05:00	All is Ok	60	65	78.87386	19.0625	6	0	OFF	0
17.9	2024-10-27T03:07:36.14420064-05:00	All is Ok	60	66.9	78.85458	18.5	6	0	OFF	0
17.3	2024-10-27T05:07:42.21625401-05:00	All is Ok	60	66.6	75.64452	18.125	6	0	OFF	0
17.1	2024-10-27T07:07:44.28828140-05:00	All is Ok	60	67.2	78.0189	17.875	6	0	OFF	0
18.1	2024-10-27T09:07:50.36034312-05:00	All is Ok	60	65.9	75.99052	18.4375	6	0	OFF	0
19.9	2024-10-27T11:07:57.43241221-05:00	All is Ok	60	63.2	75.23052	19.625	6	0	OFF	0
21.9	2024-10-27T13:08:00.50443754-05:00	All is Ok	60	56.7	73.97035	21.1875	6	0	OFF	0
22.9	2024-10-27T15:08:06.57650308-05:00	All is Ok	60	54.3	75.29177	21.9375	6	0	OFF	0
22.9	2024-10-27T17:08:13.64856821-05:00	All is Ok	60	50.7	74.73169	22.25	6	0	OFF	0
22.1	2024-10-27T19:08:20.72064218-05:00	All is Ok	60	53.3	76.66795	21.6875	6	0	OFF	0
21.1	2024-10-27T21:08:23.79267080-05:00	All is Ok	60	58.4	79.2959	21.125	6	0	OFF	0
20.1	2024-10-27T23:07:39.018560-05:00	All is Ok	60	61.7	78.14286	20.3125	6	0	OFF	0
19.4	2024-10-28T01:07:42.7221408-05:00	All is Ok	60	64.3	76.32829	19.875	6	0	OFF	0
18.9	2024-10-28T03:07:44.14422769-05:00	All is Ok	60	65.9	77.09755	19.4375	6	0	OFF	0
18.4	2024-10-28T05:07:48.21627120-05:00	All is Ok	60	65.9	75.59193	19	6	0	OFF	0
18.2	2024-10-28T07:07:49.28828046-05:00	All is Ok	60	67.7	77.09575	18.75	6	0	OFF	0
18.9	2024-10-28T09:07:52.36031338-05:00	All is Ok	60	65.9	77.01544	19.3125	6	0	OFF	0
20.2	2024-10-28T11:07:59.43237968-05:00	All is Ok	60	62.2	75.49451	20.1875	6	0	OFF	0
21.1	2024-10-28T13:08:05.50444520-05:00	All is Ok	60	59.7	75.73763	20.875	6	0	OFF	0
21.3	2024-10-28T15:08:08.57647144-05:00	All is Ok	60	56.5	75.95009	21.125	6	0	OFF	0
21.1	2024-10-28T17:08:09.64847669-05:00	All is Ok	60	56.6	77.24358	20.9375	6	0	OFF	0
20.4	2024-10-28T19:08:12.72051578-05:00	All is Ok	60	56.5	76.76273	20.5	6	0	OFF	0
19.5	2024-10-28T21:08:17.79255996-05:00	All is Ok	60	59.3	75.5858	19.75	6	0	OFF	0
18.8	2024-10-28T23:07:39.016437-05:00	All is Ok	60	61.2	77.52381	19.1875	6	0	OFF	0
18.2	2024-10-29T01:07:42.7219452-05:00	All is Ok	60	62.1	73.80158	18.6875	6	0	OFF	0
17.3	2024-10-29T05:07:58.21634649-05:00	All is Ok	60	64.2	76.57599	17.9375	6	0	OFF	0

Anexo 8: Muestra de Datos del prototipo 2 (20 maceta – riego por micro goteo)

Air Temperature	DateLoadAt	Message Status	MinSoil MoisturePercent	Relative Humidity	SoilMoisture Percent	Soil Temperature	Time ValveOn	TimeValve TurnedOn	Valve Status	Volume
16	2025-01-17T08:08:49.57657039-05:00	All is Ok	66	73.8	66.72657	16.9375	21	0	OFF	0
17.6	2025-01-17T09:54:01.63969147-05:00	All is Ok	66	67.5	64.60604	18.0625	21	14.196	ON	0.313
17.6	2025-01-17T09:54:09.63976918-05:00	All is Ok	66	67.5	68.68398	18.0625	21	0	OFF	0
17.8	2025-01-17T10:08:53.64860380-05:00	All is Ok	66	66.5	75.2558	18.25	21	0	OFF	0
20.2	2025-01-17T12:08:56.72063563-05:00	All is Ok	66	56.6	71.12233	19.8125	21	0	OFF	0
22	2025-01-17T14:09:02.79269990-05:00	All is Ok	66	54.5	72.57558	21.375	21	0	OFF	0
22.8	2025-01-17T16:08:11.013344-05:00	First Load	66	54.1	74.52381	22.125	21	0	OFF	0
22.5	2025-01-17T18:08:25.7227008-05:00	All is Ok	66	55.6	74.64714	21.75	21	0	OFF	0
20.5	2025-01-17T20:08:35.14436939-05:00	All is Ok	66	61.7	74.55135	20.3125	21	0	OFF	0
19	2025-01-17T22:08:38.21639519-05:00	All is Ok	66	66.8	74.74552	19.25	21	0	OFF	0
18	2025-01-18T00:08:45.28847284-05:00	All is Ok	66	71.5	74.53552	18.5625	21	0	OFF	0
17.4	2025-01-18T02:08:55.36057331-05:00	All is Ok	66	72.1	74.68711	18.0625	21	0	OFF	0
16.5	2025-01-18T04:09:01.43263263-05:00	All is Ok	66	74	74.29611	17.375	21	0	OFF	0
15.7	2025-01-18T06:09:09.50471008-05:00	All is Ok	66	74.7	72.97996	16.625	21	0	OFF	0
16.2	2025-01-18T08:09:16.57678373-05:00	All is Ok	66	74	71.38213	17.0625	21	0	OFF	0
18.3	2025-01-18T10:09:22.64883622-05:00	All is Ok	66	67.5	72.32457	18.625	21	0	OFF	0
21.7	2025-01-18T12:09:29.72091141-05:00	All is Ok	66	57.3	73.22954	21.1875	21	0	OFF	0
22.3	2025-01-18T14:09:39.79301183-05:00	All is Ok	66	56	71.64589	21.5	21	0	OFF	0
22.4	2025-01-18T16:08:32.025625-05:00	All is Ok	66	57	70.33334	21.8125	21	0	OFF	0
21.7	2025-01-18T18:08:32.7225647-05:00	All is Ok	66	59.8	72.04953	21.25	21	0	OFF	0
19.8	2025-01-18T20:08:33.14425867-05:00	All is Ok	66	66	69.79688	19.75	21	0	OFF	0
18.4	2025-01-18T22:08:37.21630149-05:00	All is Ok	66	72.2	72.65256	18.9375	21	0	OFF	0
17.4	2025-01-19T00:08:42.28835651-05:00	All is Ok	66	75.3	68.74577	18.125	21	0	OFF	0
16.9	2025-01-19T02:08:45.36038304-05:00	All is Ok	66	76.1	72.08894	17.75	21	0	OFF	0
16.5	2025-01-19T04:08:45.43238495-05:00	All is Ok	66	76.5	69.51011	17.3125	21	0	OFF	0
16	2025-01-19T06:08:52.50444796-05:00	All is Ok	66	77.3	68.29695	16.9375	21	0	OFF	0
16.1	2025-01-19T07:10:13.54126022-05:00	All is Ok	66	77.1	64.26863	16.9375	21	12.529	ON	0.287
16.1	2025-01-19T07:10:20.54133593-05:00	All is Ok	66	77.1	68.96765	16.9375	21	0	OFF	0
16.7	2025-01-19T08:08:59.57651735-05:00	All is Ok	66	76.4	72.32958	17.375	21	0	OFF	0

Anexo 9: Muestra de Datos del prototipo 3 (10 macetas – riego por micro aspersión)

Air Temperature	DateLoadAt	Message Status	MinSoil MoisturePercent	Relative Humidity	SoilMoisture Percent	Soil Temperature	Time ValveOn	TimeValve TurnedOn	Valve Status	Volume
18.9	2025-05-01T16:26:07.21641830-05:00	All is Ok	63	63.9	75.9956	20.125	5	0	OFF	0
16.4	2025-05-01T18:26:21.28855680-05:00	All is Ok	63	76.8	78.60673	17.75	5	0	OFF	0
15.4	2025-05-01T20:26:23.36056991-05:00	All is Ok	63	83	78.84081	16.5625	5	0	OFF	0
14.5	2025-05-01T22:26:28.43262890-05:00	All is Ok	63	86.6	74.16319	15.6875	5	0	OFF	0
14	2025-05-02T00:26:35.50469953-05:00	All is Ok	63	84.1	79.28112	14.9375	5	0	OFF	0
13.4	2025-05-02T02:26:42.57676884-05:00	All is Ok	63	84.8	76.59926	14.3125	5	0	OFF	0
13.2	2025-05-02T04:26:49.64883934-05:00	All is Ok	63	86.7	78.06915	13.9375	5	0	OFF	0
13	2025-05-02T06:26:50.72084626-05:00	All is Ok	63	88.4	77.1162	13.6875	5	0	OFF	0
19.5	2025-05-02T10:25:54.021365-05:00	All is Ok	63	60.4	68.14286	16.8125	5	0	OFF	0
24.8	2025-05-02T12:25:57.7224079-05:00	All is Ok	63	44.3	76.56508	20.25	5	0	OFF	0
24.1	2025-05-02T12:57:10.019380-05:00	All is Ok	63	47.5	80.66666	20.6875	5	0	OFF	0
20.2	2025-05-02T14:57:14.7222956-05:00	All is Ok	63	60.2	82.54787	20.1875	5	0	OFF	0
17.5	2025-05-02T16:57:20.14429066-05:00	All is Ok	63	77.3	81.19901	18.4375	5	0	OFF	0
16.2	2025-05-02T18:57:25.21634272-05:00	All is Ok	63	81.3	76.96213	17.25	5	0	OFF	0
15.6	2025-05-02T20:57:28.28837045-05:00	All is Ok	63	82.8	73.57105	16.4375	5	0	OFF	0
15.2	2025-05-02T22:57:29.36038095-05:00	All is Ok	63	86.2	75.79129	16.0625	5	0	OFF	0
14.7	2025-05-03T00:57:34.43243202-05:00	All is Ok	63	88.1	79.17797	15.5	5	0	OFF	0
14	2025-05-03T02:57:35.50444150-05:00	All is Ok	63	90.2	77.01228	15	5	0	OFF	0
13.8	2025-05-03T04:26:01.55750076-05:00	All is Ok	63	90.6	60.71242	14.625	5	4.203	ON	0.177
13.8	2025-05-03T04:26:09.55757627-05:00	All is Ok	63	90.6	72.3324	14.5625	5	0	OFF	0
13.8	2025-05-03T04:57:40.57649211-05:00	All is Ok	63	90.3	77.07593	14.5625	5	0	OFF	0
15.4	2025-05-03T06:57:43.64852231-05:00	All is Ok	63	81	74.81504	14.625	5	0	OFF	0
21.8	2025-05-03T08:57:45.72054020-05:00	All is Ok	63	55.4	80.21846	17.4375	5	0	OFF	0
24.7	2025-05-03T10:57:50.79258610-05:00	All is Ok	63	45.6	75.46795	20.4375	5	0	OFF	0
26.1	2025-05-03T12:57:12.018913-05:00	All is Ok	63	39.7	77.90476	21.4375	5	0	OFF	0
23.5	2025-05-03T14:57:14.7220256-05:00	All is Ok	63	49.9	73.42055	21.4375	5	0	OFF	0
19.8	2025-05-03T16:48:58.024493-05:00	All is Ok	63	59.4	82.71429	20.1875	5	0	OFF	0
18.1	2025-05-03T18:49:01.7227168-05:00	All is Ok	63	73.7	74.43771	19.25	5	0	OFF	0
16.1	2025-05-03T20:49:04.14429757-05:00	All is Ok	63	78	78.20837	17.625	5	0	OFF	0

Anexo 10: Estadísticos descriptivos por cada prototipo

Prototipo 1: Riego por micro goteo

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
AirTemperature	2405	25,2	,0	25,2	17,469	2,5143	6,322
MinSoilMoisturePercent	2405	8	60	68	66,89	2,765	7,643
RelativeHumidity	2405	100,0	,0	100,0	72,905	13,4561	181,068
SoilMoisturePercent	2405	76,61	12,92	89,57	73,77	5,42145	29,392
SoilTemperature	2405	22,3750	,0000	22,3750	17,544	2,264	5,126
TimeValveTurnedOn	2405	12,825	,000	12,825	,40098	1,550566	2,404
Volume	2406	4,1389	,000	4,1389	,00344	,0849	,007
N válido (por lista)	2405						

Prototipo 2: Riego por micro goteo

Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
AirTemperature	2364	12,5	27,3	18,540	2,7459	7,540
MinSoilMoisturePercent	2364	65	66	65,99	,098	,010
RelativeHumidity	2364	30,4	96,7	68,455	12,8693	165,620
SoilMoisturePercent	2364	44,463	88,010	73,379	4,8997	24,008
SoilTemperature	2364	12,500	24,625	18,3768	2,30948	5,334
TimeValveTurnedOn	2364	,000	47,294	,63280	3,449332	11,898
Volume	2365	,000	29,635	,0250	,6138	,377
N válido (por lista)	2364					

Prototipo 3: Riego por micro aspersión

Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza
AirTemperature	2551	12,4	30,5	18,337	3,0385	9,232
MinSoilMoisturePercent	2551	63	63	63,00	,000	,000
RelativeHumidity	2551	28,6	95,6	69,892	13,4257	180,251
SoilMoisturePercent	2551	45,394	106,667	81,2334	6,972	48,613
SoilTemperature	2551	-127,0000	85,0000	17,658139	7,7548763	60,138
TimeValveTurnedOn	2551	,000	8,535	,13682	,754885	,570
Volume	2552	,0000	15,063	,0118	,29986	,090
N válido (por lista)	2551					