

Automated Water Optimization System for Allium fistulosum Crops: A Low-Cost IoT Solution for Urban Agriculture

David Juan Fuentes-Maza, Ingeniero de Telecomunicaciones¹ , Aarón Enrique Llanos-Soto² , Juan Francisco Gayoso-Calvo³ ; Elvis Ederson Laguna-Flores⁴ 

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c25670@utp.edu.pe, u17307900@utp.edu.pe, u18210822@utp.edu.pe, u18206463@utp.edu.pe

Resumen— This article presents the design and implementation of an automated irrigation system for urban crops of *Allium fistulosum* (chives), based on soil moisture sensors and a low-cost IoT architecture. The system uses an ESP32 microcontroller as the processing and communication unit, which collects real-time data from capacitive sensors and an ultrasonic sensor to estimate the available water level. Data is transmitted via HTTP requests to a Google Sheets spreadsheet, using Google Apps Script as the bridge between the hardware and the cloud. Building upon this infrastructure, the system operates autonomously, activating water pumps when humidity levels fall below defined thresholds. Sensor calibration translated the analog readings into humidity percentages, ensuring an accurate and efficient response. The results demonstrate a 92.86% reduction in water use compared to manual irrigation, while maintaining optimal conditions for crop development. This solution represents an accessible, replicable alternative aligned with the principles of sustainability and automation in urban agriculture.

Keywords: IoT, ESP32, automated irrigation, urban agriculture, humidity sensors, Google Apps Script

Sistema Automatizado de Optimización Hídrica para Cultivos de *Allium fistulosum*: Una solución de IoT de bajo costo para la Agricultura Urbana

David Juan Fuentes-Maza, Ingeniero de Telecomunicaciones¹, Aarón Enrique Llanos-Soto²; Juan Francisco Gayoso-Calvo³; Elvis Ederson Laguna-Flores⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c25670@utp.edu.pe, u17307900@utp.edu.pe, u18210822@utp.edu.pe, u18206463@utp.edu.pe

Resumen— Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema automatizado de riego para cultivos urbanos de *Allium fistulosum* (cebollino), basado en sensores de humedad del suelo y una arquitectura IoT de bajo costo. El sistema utiliza un microcontrolador ESP32 como unidad de procesamiento y comunicación, el cual recopila datos en tiempo real desde sensores capacitivos y un sensor ultrasónico para estimar el nivel de agua disponible. Los datos se transmiten mediante solicitudes HTTP a una hoja de cálculo en Google Sheets, empleando Google Apps Script como puente entre el hardware y la nube. El sistema opera de manera autónoma, activando bombas de agua cuando los niveles de humedad caen por debajo de los umbrales definidos. La calibración de los sensores permitió traducir las lecturas analógicas a porcentajes de humedad, asegurando una respuesta precisa y eficiente. Los resultados demuestran una reducción del 92.86 % en el uso del recurso hídrico respecto al riego manual, manteniendo condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo. Esta solución representa una alternativa accesible, replicable y alineada con los principios de sostenibilidad y automatización en la agricultura urbana.

Palabras clave: IoT, ESP32, riego automatizado, agricultura urbana, sensores de humedad, Google Apps Script

I. INTRODUCCIÓN

El principal problema en la producción agrícola en invernaderos es el estrés hídrico, ya que afecta directamente el rendimiento y la resistencia de los cultivos [1]. Esta condición reduce su crecimiento y, a la vez, favorece la proliferación de plagas que pueden generar diversas fitopatologías [2]. Por estas razones, la optimización del uso del recurso hídrico se vuelve fundamental, siendo los sistemas de riego una herramienta clave para enfrentar este desafío en ambientes controlados como los invernaderos. Según iAgua, este problema se presenta cuando la demanda del recurso supera su disponibilidad [3].

Con el avance de la tecnología, es posible monitorear, controlar y automatizar los sistemas de riego, incrementando su eficiencia, sostenibilidad y contribuyendo a la conservación de los recursos hídricos. De acuerdo con un informe de las Naciones Unidas (ONU) sobre el desarrollo de los recursos hídricos, más de dos mil millones de personas están siendo afectadas por este fenómeno, lo cual limita el acceso al agua

para la agricultura y pone en riesgo la seguridad alimentaria global [4]. Asimismo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) reportó que el estrés hídrico global alcanza un 18.6 %, afectando directamente la capacidad de producción sostenible en invernaderos [5].

Por su parte, el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN) advirtió que esta problemática podría agravarse a futuro, debido al incremento proyectado del 26 % en la demanda mundial de agua para el año 2050 [6]. Esto obliga a los productores agrícolas a adoptar tecnologías avanzadas de riego y estrategias efectivas de conservación del recurso, como la implementación de sistemas de riego automatizados. En consecuencia, el estrés hídrico representa un desafío creciente para la agricultura en invernaderos, en un contexto marcado por la escasez hídrica y la presión creciente sobre la disponibilidad del agua

De acuerdo con la empresa colombiana Agroponis, especializada en suministros e insumos agrícolas, resulta fundamental garantizar la eficacia del sistema de riego para asegurar la calidad de los cultivos. El suelo debe recibir de forma constante el recurso hídrico necesario para el desarrollo óptimo de las plantas, siendo el sistema de riego un componente clave en la producción agrícola [7].

El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) indicó que el valor del agua influye directamente en la adopción de tecnologías de riego, especialmente en zonas como Villacurí y La Yarada, donde el recurso es escaso y costoso. En regiones como Chavimochic, la implementación de sistemas eficientes como el riego por goteo ha favorecido cultivos de alta rentabilidad. MIDAGRI concluye que la elección tecnológica depende del costo del agua y la rentabilidad, promoviendo proyectos que integren fuentes hídricas superficiales y subterráneas [8]. En línea con esta perspectiva, MIDAGRI ha ejecutado más de 130 proyectos de riego tecnificado en 19 regiones durante 2025, beneficiando a más de 7,000 familias y mejorando el riego en más de 8,000 hectáreas mediante tecnologías como aspersión, goteo y multicompuertas. Según AGROPRESS, estas intervenciones han logrado hasta un 40% de mejora en eficiencia hídrica y un incremento del 30% en productividad agrícola [20].

Por su parte, la empresa Netafim, con sede en Lima, indicó que los cultivos en huertos enfrentan amenazas como olas de calor, heladas, plagas agresivas y sistemas de riego inadecuados, lo que puede llevar a pérdidas totales. Señala que un sistema de riego de precisión, al suministrar agua y nutrientes de manera adecuada, permite ahorrar recursos, aumentar la eficiencia y reducir los riesgos asociados al cultivo. Estos avances son posibles gracias a tecnologías actuales que permiten el monitoreo detallado de cada etapa del cultivo y la automatización del suministro de agua [9].

En este contexto, diversos estudios respaldan la implementación de tecnologías de riego inteligente. La investigación desarrollada por [10] tuvo como objetivo diseñar un sistema inteligente de riego basado en IoT para optimizar el uso del agua mediante soluciones tecnológicas de bajo costo. Utilizó un microcontrolador ESP32 para gestionar en tiempo real datos provenientes de sensores de humedad, temperatura y nivel de agua, almacenándolos en la nube. El sistema se activaba automáticamente cuando la humedad descendía por debajo del 30 % o cuando el nivel del tanque alcanzaba el 10 %, logrando reducir significativamente el desperdicio del recurso. Los autores concluyeron que se trata de una alternativa económica y eficiente para la optimización del riego agrícola.

De forma similar, la investigación de [11] tuvo como objetivo el diseño e implementación de un sistema mecatrónico de riego automatizado para invernaderos, priorizando el bajo costo y la adaptabilidad en zonas rurales. El sistema utilizó un microcontrolador PIC18F4550, un módulo Bluetooth y sensores de temperatura y humedad. La bomba de agua se activaba al detectar 29 °C de temperatura o 70 % de humedad, transmitiendo los datos en tiempo real a una aplicación móvil. La evaluación en un entorno controlado demostró su efectividad, concluyendo que representa una opción viable para optimizar el riego en invernaderos.

Por último, la investigación de [12] propuso un sistema automatizado de monitoreo para invernaderos enfocado en mejorar la disponibilidad del cultivo mediante la optimización del uso hídrico. Se empleó una ESP32 junto a sensores de humedad del suelo, temperatura, humedad ambiental y luz. El sistema activaba automáticamente los dispositivos mediante relés al cumplirse ciertas condiciones, como una temperatura superior a 30 °C para los ventiladores, una humedad relativa con umbral del 20 %, una iluminación menor a 2500 cd para activar la luz y una humedad del suelo inferior a 4 kPa para accionar las bombas de agua. Los datos se enviaban a la plataforma ThingSpeak para su visualización. Los resultados fueron satisfactorios, destacando que la solución mejora la precisión en la administración del agua y es viable, escalable y de bajo costo (US\$110.94).

Las investigaciones coinciden en que los sistemas de riego automatizado son clave para una gestión eficiente del agua en

invernaderos. Estos sistemas requieren tres elementos: un método de distribución (como goteo o microaspersión), sensores para recolectar datos sobre variables como la humedad, y un mecanismo de automatización que procese la información y controle dispositivos como bombas de riego [13][14][15][16].

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se describe la metodología, incluyendo el diseño experimental y el equipamiento empleado. En la Sección III se detalla el diseño del sistema propuesto, sus componentes y la arquitectura de comunicación. En la Sección IV se presentan los resultados obtenidos y su análisis. La Sección V discute los hallazgos en relación con estudios previos y las implicancias prácticas. Finalmente, en la Sección VI se exponen las conclusiones y líneas de mejora futuras.

En ese marco, el objetivo principal de esta investigación es diseñar e implementar un sistema de riego automatizado para el cultivo de cebollinos (*Allium fistulosum*) mediante IoT.

Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes dos objetivos específicos:

- OE1: Optimizar el uso de recurso hídrico durante el periodo de crecimiento del cultivo del cebollino.
- OE2: Comparar el desarrollo del cebollino con el sistema automático versus un sistema manual de riego

II. METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo aplicada, cuantitativa, experimental y de corte transversal, desarrollada durante los meses de abril, mayo y julio. Se trabajó con dos grupos: uno de control con 4 muestras de cebollinos regadas manualmente, según la experiencia del supervisor, y otro experimental con 4 muestras regadas mediante un sistema automatizado. Este sistema integra sensores de humedad del suelo, un microcontrolador ESP32 y una arquitectura de comunicación HTTP, que permite el envío de datos a Google Sheets mediante Google Apps Script. La variable independiente es el sistema de automatización IoT, mientras que la variable dependiente corresponde a la optimización hídrica basándose en mediciones de humedad del suelo, la respuesta del sistema y el consumo hídrico.

A. Selección de equipamiento para la implementación

Para la implementación del sistema de riego automatizado se utilizó el microcontrolador ESP32 DevKit V1, elegido por su bajo consumo, doble núcleo y conectividad Wi-Fi, ideal para entornos agrícolas urbanos. El sistema incorpora sensores capacitivos de humedad V2.0 por su durabilidad y precisión en exteriores, así como bombas sumergibles RS-150PUMP de bajo caudal, activadas mediante módulos relé de 4 canales que permiten controlar múltiples dispositivos. Además, se integró un sensor ultrasónico HC-SR04 para estimar el nivel de agua en

el tanque. Todos los componentes fueron ensamblados bajo una arquitectura modular y económica.

B. Procedimiento de recolección de datos

La recolección de datos comenzó con la calibración de los sensores de humedad, estableciendo puntos de referencia para condiciones de humedad del 0 % (sensor en aire seco) y del 100 % (sensor sumergido en agua). Posteriormente, se ensambló el sistema físico conectando los sensores, bombas, relés y el ESP32 en una red controlada.

Una vez verificada la operatividad del sistema, se configuró la comunicación mediante solicitudes HTTP para el envío de datos hacia Google Sheets, utilizando un script desarrollado en Google Apps Script. Esto permitió registrar en tiempo real los valores de humedad del suelo, el consumo de agua y el estado de activación de las bombas. El sistema operó de forma continua, ejecutando ciclos de monitoreo y riego en intervalos de 30 minutos.

C. Análisis e interpretación de resultados.

El análisis se centró en la eficiencia hídrica del sistema automatizado en comparación con un sistema de riego manual. Se evaluaron indicadores como el volumen total de agua utilizada, el tiempo de respuesta del sistema, la humedad promedio del sustrato y el crecimiento de las plantas. Además, se observó la robustez operativa del sistema IoT, la estabilidad de las conexiones inalámbricas y la fiabilidad de los sensores durante el periodo de prueba.

Los datos recolectados fueron comparados con registros manuales para determinar el ahorro de agua y la eficacia en el mantenimiento de condiciones óptimas de humedad. También se analizó el impacto del sistema en el crecimiento de las hojas de cebollino, mediante mediciones físicas y observaciones fotográficas.

D. Limitaciones

Una de las principales limitaciones del estudio fue la ejecución de pruebas en un entorno controlado con macetas, lo que limita su extrapolación a cultivos a gran escala. Además, la dependencia de Wi-Fi y la necesidad de calibración frecuente de los sensores pueden afectar su desempeño en zonas rurales. También se enfrentaron restricciones presupuestarias, utilizando materiales complementarios elaborados artesanalmente.

E. Implicancias teóricas, prácticas y metodológicas

El estudio valida teóricamente la aplicación del IoT como solución al estrés hídrico, demostrando en la práctica que un sistema automatizado de bajo costo puede optimizar el riego sin afectar el crecimiento del cultivo. Metodológicamente, propone una arquitectura replicable para agricultura urbana, basada en

sensorización, comunicación vía HTTP y automatización con Google Apps Script

III. DISEÑO

El diseño se basa en un microcontrolador ESP32 conectado a sensores de humedad del suelo y un sensor ultrasónico para estimar el consumo de agua. Los datos recopilados se procesan localmente y se transmiten mediante solicitudes HTTP hacia una hoja de cálculo en Google Sheets, usando Google Apps Script como intermediario. Los usuarios pueden visualizar los registros en tiempo real, facilitando el análisis y control de los parámetros de riego. Se reitera que un grupo de 4 cebollinos serán regados de manera manual de acuerdo con el conocimiento del supervisor y otro grupo de 4 cebollinos mediante el sistema automatizado de riego

A. Elementos del sistema

1) Microcontrolador ESP32

Este microcontrolador cuenta con un procesador de doble núcleo, conectividad integrada Wi-Fi y Bluetooth, y múltiples interfaces (ADC, UART, GPIO). Dentro del sistema de riego automatizado, el ESP32 se encarga de recopilar los datos de los sensores de humedad del suelo y del sensor ultrasónico, tomar decisiones sobre la activación de bombas, y enviar la información recopilada mediante solicitudes HTTP a una hoja de cálculo en Google Sheets.

2) Periféricos del sistema

El sistema incorpora sensores capacitivos de humedad del suelo V2.0, seleccionados por su durabilidad y precisión en exteriores, fundamentales para determinar cuándo activar el riego. También se incluye un sensor ultrasónico HC-SR04, utilizado para estimar el nivel de agua disponible en el tanque. La activación de las bombas se gestiona mediante un módulo relé de 4 canales, que conmuta cargas de hasta 10 A. Finalmente, se utilizan bombas sumergibles RS-150PUMP de bajo consumo, responsables de ejecutar el riego automatizado por zonas.

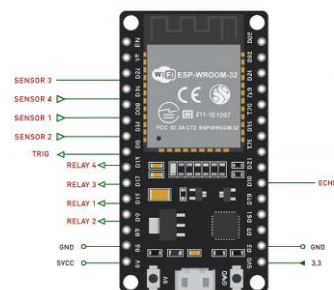


Fig. 1 Conexiones al ESP32

B. Arquitectura y Operación basado en IOT

B.1) Adquisición de datos

El sistema recopila información de múltiples sensores de humedad colocados en distintas zonas del cultivo. Estos sensores envían sus lecturas al ESP32 mediante entradas analógicas, lo que permite conocer el estado hídrico del sustrato en tiempo real. Además, el sensor ultrasónico proporciona estimaciones del nivel de agua disponible.

B.2) Procesamiento local

El ESP32 interpreta los valores analógicos de los sensores, los convierte en porcentajes de humedad, evalúa si es necesario activar alguna bomba y compila los datos junto al estado del sistema. Este procesamiento garantiza que las decisiones de riego sean locales y autónomas, sin requerir conectividad permanente para funcionar.

B.3) Transmisión de datos

Los datos procesados son enviados mediante solicitudes HTTP tipo POST a un script de Google Apps Script, el cual los registra automáticamente en una hoja de cálculo de Google Sheets. Esta arquitectura elimina la necesidad de un servidor intermedio o un broker MQTT, facilitando la implementación en entornos de bajo costo.

B.4) Gestión centralizada

Google Sheets actúa como base de datos en la nube, permitiendo el almacenamiento y visualización histórica de los parámetros del sistema. Los usuarios pueden acceder a estos registros en tiempo real para evaluar tendencias de riego, revisar posibles fallos en sensores o bombas, y supervisar el consumo hídrico por día o por activación.

B.5) Interacción del usuario

Aunque el sistema opera de forma autónoma, los usuarios pueden revisar el desempeño del riego desde cualquier dispositivo conectado mediante la visualización remota en Google Sheets. Además, se documentan eventos de activación, estado de sensores y volumen de agua utilizado, lo que permite evaluar la eficiencia del sistema sin intervención manual directa.

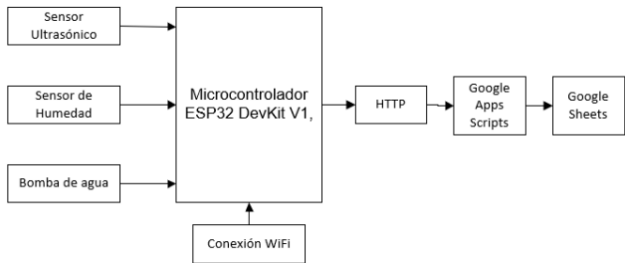


Fig. 2 Diagrama en bloques de operación del sistema

El proceso comienza con la medición de la humedad, lo que permite determinar si se encuentra por debajo del umbral mínimo establecido. En caso afirmativo, el microcontrolador activará una salida para encender la bomba y registrar el evento

en la base de datos. Cuando la humedad este entre los 55% y 70%, la bomba se apagará. En ambos casos, los datos se enviarán a la base de datos a través de Wi-Fi. Este ciclo se repite de manera continua hasta que se detenga manualmente.

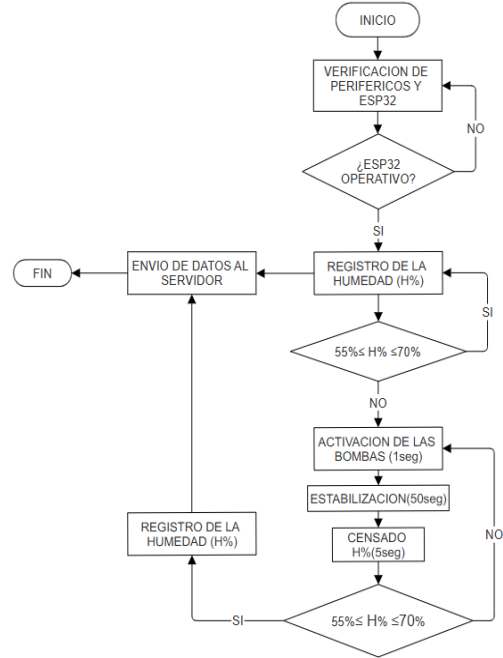


Fig. 3 Diagrama de flujo del funcionamiento

C. Conexión y programación del sistema

C.1) Programación general

El código desarrollado para este proyecto está dividido en tres bloques principales y ha sido publicado en línea para su consulta detallada [18]. En la primera etapa, se incorporan las librerías necesarias para la conectividad Wi-Fi y la transmisión de datos vía HTTP. También se definen los pines asignados a los sensores de humedad, los relés de las bombas y el sensor ultrasónico. Se configuran los parámetros de calibración, los umbrales de riego y las variables de estado del sistema, incluyendo la conexión Wi-Fi, la URL del script de Google Sheets y el intervalo de tiempo entre ciclos de riego. En la función setup(), se establece la comunicación serial, se configuran los pines como entradas o salidas según su función y se desactivan preventivamente las bombas al iniciar el sistema. Luego, se realiza la conexión a la red Wi-Fi y una lectura inicial de los sensores para validar su operatividad. En la función loop(), el sistema opera de forma continua, verificando cada 30 minutos los niveles de humedad del suelo. Si un sensor reporta un valor por debajo del umbral, se activa la bomba correspondiente mediante la función cicloBomba(), que permite un riego zonificado y adaptativo. Si tras varios intentos no se detecta mejora en los niveles de humedad ni consumo de agua, el sensor es marcado como defectuoso, permitiendo detectar fallos en la medición o el riego (Fig 4).

C.2) Funciones auxiliares

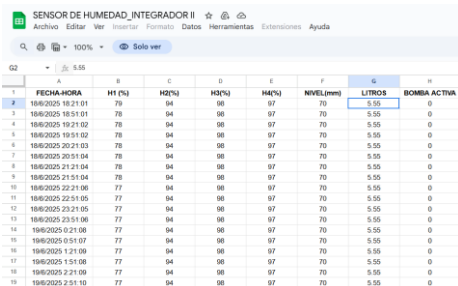
El sistema incorpora funciones específicas para la medición y conversión de datos clave en el riego automatizado. La humedad del suelo se calcula en porcentaje a partir de lecturas analógicas, permitiendo una evaluación precisa del estado hídrico por zona. A su vez, el sensor ultrasónico estima el volumen de agua en litros según la distancia medida, facilitando el monitoreo del consumo. Este mismo sensor permite conocer el nivel disponible en el tanque de riego. Todos los datos como humedad, volumen y estado del sistema se envían automáticamente a una hoja de cálculo de Google Sheets mediante un Google Script, lo que habilita el registro y análisis remoto en tiempo real.

```
1 #include <WiFi.h> 16 // Valores de referencia para conversión a percent
2 #include <HTTPClient.h> 17 #define SOLO_VALOR 300
3 // Pines sensores de humedad 18 #define AGUA_VALOR 1000
4 #define HUM1_PIN 32 19 // Umbrales
5 #define HUM2_PIN 33 20 #define UMBRAL_ACTIVACION 55
6 #define HUM3_PIN 34 21 #define UMBRAL_DESACTIVACION 70
7 #define HUM4_PIN 35 22 // Tiempos
8 // Pines de relé 23 #define CICLO_TIEMPO 20000
9 #define RELAY1_PIN 25 24 #define ESPERA_ESTABILIZACION 30000
10 #define RELAY2_PIN 26 25 #define RELAY_FALLA_TIEMPO 5000
11 #define RELAY3_PIN 27 26 #define MAX_INTENTOS 3
12 #define RELAY4_PIN 14 27 // Estado sensores
13 // Pines ultrasónico 28 bool sensor1_fallo = false;
14 #define TRIG_PIN 13 29 bool sensor2_fallo = false;
15 #define ECHO_PIN 4
```

Fig. 4 Programación del sistema de riego automatizado

3) Script Google Sheets - humedad, nivel, litros y bomba

Esta función doPost(e) en Google Apps Script recibe los datos enviados por el ESP32 mediante una solicitud HTTP POST, los separa por comas y verifica su integridad. Si los valores son suficientes, los transforma en una fila con fecha, lecturas de humedad, nivel de agua, litros estimados y estado de la bomba, luego los guarda en una hoja de cálculo de Google Sheets. También registra logs de éxito o error según corresponda.



	A	B	C	D	E	F	G	H
	FECHA-HORA	H1 (%)	H2 (%)	H3 (%)	H4 (%)	NIVEL(mm)	LITROS	BOMBA ACTIVA
1	18/06/2025 18:21:01	79	04	08	97	70	5.55	0
2	18/06/2025 18:51:01	78	04	08	97	70	5.55	0
3	18/06/2025 19:21:02	78	04	08	97	70	5.55	0
4	18/06/2025 19:51:02	78	04	08	97	70	5.55	0
5	18/06/2025 20:21:03	78	04	08	97	70	5.55	0
6	18/06/2025 20:51:04	78	04	08	97	70	5.55	0
7	18/06/2025 21:21:04	78	04	08	97	70	5.55	0
8	18/06/2025 21:51:04	78	04	08	97	70	5.55	0
9	18/06/2025 22:21:06	77	04	08	97	70	5.55	0
10	18/06/2025 22:51:05	77	04	08	97	70	5.55	0
11	18/06/2025 23:21:05	77	04	08	97	70	5.55	0
12	18/06/2025 23:51:06	77	04	08	97	70	5.55	0
13	18/06/2025 0:21:06	77	04	08	97	70	5.55	0
14	18/06/2025 0:51:07	77	04	08	97	70	5.55	0
15	18/06/2025 1:21:09	77	04	08	97	70	5.55	0
16	18/06/2025 1:51:08	77	04	08	97	70	5.55	0
17	18/06/2025 2:21:09	77	04	08	97	70	5.55	0
18	18/06/2025 2:51:10	77	04	08	97	70	5.55	0

Fig. 5 Registro de humedad del sistema automática

D. Calibración de sensores

Para asegurar una interpretación adecuada de las lecturas de los sensores de humedad, se realizó una calibración básica basada en dos puntos de referencia. Primero, se midió el valor del sensor en aire seco, considerado como 0% de humedad, con lecturas típicas entre 2500 y 2800. Luego, se sumergió

completamente el sensor en agua, representando el 100% de humedad, con valores entre 900 y 1100. Estos extremos permitieron aplicar un mapeo lineal que traduce cualquier lectura analógica en un porcentaje de humedad entre 0% y 100%. Esta calibración fue esencial para que el sistema de riego responda de forma automática y precisa a las condiciones del suelo.

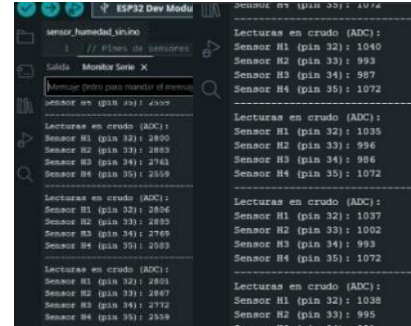


Fig. 6 Sensores calibrados

E. Implementación Física

Durante esta etapa se llevó a cabo la conexión física de todos los componentes del sistema. Se utilizó una arquitectura modular que integra el microcontrolador ESP32, sensores de humedad, sensor ultrasónico, módulo de relés y bombas de agua. Para garantizar una alimentación estable y segura, se emplearon dos fuentes de energía diferenciadas:

Una fuente de 12V encargada de alimentar al ESP32, a los sensores de humedad, al sensor ultrasónico y al módulo de relés. Una segunda fuente de 5V dedicada exclusivamente a la alimentación de las bombas de agua, con el objetivo de aislar el consumo de corriente y evitar caídas de voltaje en el microcontrolador. Dado que los cables originales de los sensores de humedad eran muy cortos, se procedió a extender cada conexión mediante la soldadura de cables adicionales. Todas las conexiones fueron aseguradas con soldadura directa, mejorando así la firmeza del sistema y evitando posibles falsos contactos durante la operación. En esta fase también se verificó que todas las conexiones estuvieran correctamente asignadas según el diseño del prototipo, y se documentaron las adaptaciones realizadas respecto al diseño inicial.

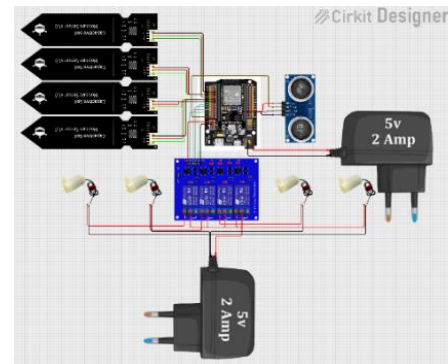


Fig. 7 Representación gráfica de la conexión física



Fig. 8 Implementación del circuito

IV. RESULTADOS

A fin de verificar el funcionamiento correcto del sistema, previamente se trabajó con 8 macetas: 4 macetas para el sistema de riego automático y 4 macetas para el sistema de riego manual). Cada planta *Allium fistulosum* (cebollino) fue cultivada en macetas individuales, empleando 400 gramos de compost por unidad como sustrato principal. Esta condición fue mantenida de forma uniforme para asegurar la consistencia en los resultados obtenidos posteriormente. El periodo de cosecha de los cebollinos tomó 18 días después del sembrado de los bulbos. Para no alterar la consistencia de los datos todos los bulbos fueron sembrados del mismo tamaño y cantidad de hojas



Fig. 9 Sistema de riego automatizado y manual implementado

A. Resultados del grupo de control manual

Para el análisis del sistema manual una persona experta proyecto conocedora de los parámetros clave como temperatura, humedad, recurso hídrico en este tipo de cultivos registró manualmente las veces que regaba cada maceta junto a la cantidad de agua. La tabla los momentos en que ocurrieron los riegos de aproximadamente de 700ml.

TABLA 1
REGISTROS DE LOS DATOS DEL RIEGO MANUAL

Registro de la humedad del sistema de riego manual						
Fecha / Hora	H1(%)	H2(%)	H3(%)	H4(%)	Agua (ml)	Riegos
20/6/25 - 9:51:52	100	92	99	100	700	1
20/6/25 - 9:52:53	96	95	93	98	700	1
20/6/25 - 9:52:55	99	95	92	100	700	1
27/6/25 - 12:55:01	98	62	97	99	700	1

Así mismo en la tabla 2 dicha tabla se muestra que, durante todo el proceso del proyecto, el experto ha regado un total de 4 veces, aplicando aproximadamente en cada ocasión los 700ml, lo que suma un total de 2,8 litros de recurso usado, la cual mantenía un promedio del 92,67 % de humedad.

TABLA 2
RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA MANUAL

Promedio de la humedad relativa de riego manual				Total (%)	Número de riegos	Cant. agua (ml)
PROM H1(%)	PROM H2(%)	PROM H3(%)	PROM H4(%)			
96.38	83.05	92.96	98.29	92.67	4	2800

B. Resultados del grupo del sistema automatizado

De igual forma para el análisis del sistema automatizado se resume la tabla 3 mostrando los momentos en la cuales se activaron las bombas para regar las plantas donde la primera activación del sistema fue el 20 de junio del 2025 a las 9:51am donde se registró un nivel de humedad del 46 %, lo que provocó el encendido de las bombas procediendo a la aplicación del suministro de agua, el sensor ultrasonido que detectaba unos 5.55L de agua disminuyó a 5.45L donde se usó 100ml de este recurso logrando elevar la humedad hasta el 95 % con esa sola cantidad, completando el ciclo eficientemente y registrando el cierre de la bomba a las 9:52 am observando que la velocidad de respuesta del sistema es aproximadamente 1 min.

TABLA 3
REGISTROS DE LOS DATOS DEL RIEGO AUTOMATIZADO

Registro de la humedad del sistema de riego automatizado						
Fecha / Hora	H1B%	H2B%	H3B%	H4B%	Agua (L)	Bomba activa
20/6/25 - 9:51:52	46	93	89	62	5.55	0
20/6/25 - 9:52:53	95	93	89	62	5.45	H1B
20/6/25 - 9:52:55	95	93	89	62	5.45	H1B
27/6/25 - 12:55:01	89	92	91	53	5.45	0
27/6/25 - 12:56:01	89	92	91	89	5.35	H4B
27/6/25 - 12:56:03	89	92	91	89	5.35	H4B

Así mismo en la tabla 4 dicha tabla se muestra que, durante todo el proceso del proyecto, el sistema a regado un total de 2 veces, aplicando aproximadamente en cada ocasión, lo que suma un total de 2,8 litros de recurso usado, la cual mantenía un promedio del 92,67 % de humedad.

TABLA 4
RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Promedio de la humedad relativa de riego automatizado				Total (%)	Numero de riegos	Recurso hídrico utilizado (ml)
PROM H1B (%)	PROM H2B (%)	PROM H3B(%)	PROM H4B(%)			
87.91	92.33	89.9	71.92	85.5	2	200

C. Comparación del crecimiento de los cebollinos

Al realizar un análisis comparativo entre los cebollinos cultivados mediante riego manual y los que fueron sometidos a un sistema de riego automatizado, se observa una notable diferencia en el color de sus hojas. Las plantas regadas manualmente presentan un tono verde más intenso, lo que sugiere una mayor concentración de clorofila. Esta diferencia se atribuye, en parte, a la cantidad de agua utilizada en cada sistema. Como evidencia de esta observación, se emplean las figuras 14, 15, 16 y 17: los grupos identificados como H1B, H2B, H3B y H4B corresponden al sistema automatizado, mientras que H1, H2, H3 y H4 representan el sistema manual. El tono verde más oscuro podría servir como un indicador visual de madurez en los cebollinos. Sin embargo, a pesar de tener un mayor contenido de clorofila, los cebollinos del sistema manual mostraron un crecimiento limitado en comparación con los cultivados de forma automatizada. Esta diferencia sugiere que, si bien la clorofila puede estar relacionada con un perfil nutricional más completo incluyendo vitaminas como A, C y K según estudios realizados por [17], no necesariamente se traduce en un mayor vigor de crecimiento o en un desarrollo más robusto de la planta.



Fig. 10 Comparativa de la primera muestra de ambos sistemas



Fig. 11 Comparativa de la segunda muestra de ambos sistemas



Fig. 12 Comparativa de la tercera muestra de ambos sistemas

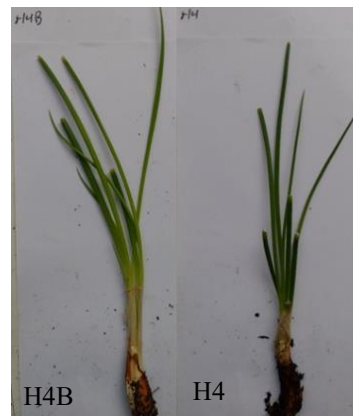


Fig. 13 Comparativa de la cuarta muestra de ambos sistemas

Tomando como referencia el tamaño de las raíces de los cebollinos, junto con el desarrollo de sus hojas, se establece una comparación entre los sistemas de cultivo. En este contexto, las figuras 18 y 19 representan el sistema manual, mientras que las figuras 20 y 21 corresponden al sistema automatizado. Esta distinción permite visualizar con mayor precisión el impacto de cada método en el crecimiento general de la planta.



Fig. 14 Tallos que fueron usados en el sistema manual

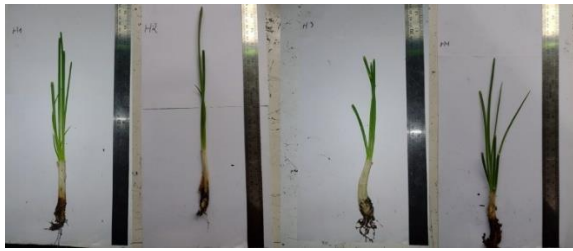


Fig. 15 Desarrollo de los tallos del sistema manual



Fig. 16 Tallos que fueron usadas en el sistema automatizado

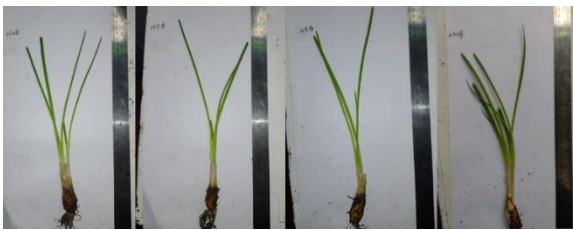


Fig. 17 Desarrollo de los tallos del sistema automatizado

A partir del proceso de recolección de datos enfocados en las hojas de los cebollinos, se pudo construir la Tabla 5, la cual presenta información relevante sobre el desarrollo de las hojas bajo el sistema manual. Asimismo, se elaboró la Tabla 6, correspondiente a los datos obtenidos mediante el sistema automatizado. El análisis de estos datos permitió evidenciar diferencias significativas entre ambos métodos. En el sistema manual, el crecimiento promedio de las hojas presenta una longitud mínima de 21 cm y una máxima de 26 cm. En contraste, el sistema automatizado mostró resultados más favorables, con una longitud mínima de crecimiento de 23 cm y una máxima de 29 cm. Además, se identificaron los tamaños más repetidos durante el proceso de medición. En el sistema manual, la longitud más frecuente fue de 24 cm, mientras que en el sistema automatizado el valor predominante alcanzó los 32 cm. Esto sugiere que, aunque el tono más oscuro indica buena salud, el sistema de riego automatizado favorece un crecimiento más uniforme y sostenido, logrando una reducción del 92.86% del recurso hídrico contribuyendo a la conservación del agua, un recurso crítico en regiones con escasez hídrica como Lima.

TABLA 5
DATOS DEL CRECIMIENTO DE LOS TALLOS DEL SISTEMA MANUAL

Sensor	Tamaño de hojas del sistema manual (cm)								Promedio de crecimiento
	Tallo	Hoja 1	Hoja 2	Hoja 3	Hoja 4	Hoja 5	Hoja 6	Hoja 7	
H1	8	33	31	28	27	24	22	17	26
H2	8	34	26	20	15	N/P	N/P	N/P	23.75
H3	6	24	23	23	30	18	N/P	N/P	23.6
H4	6	30	26	24	24	17	14	13	21.14

TABLA 6
DATOS DEL CRECIMIENTO DE LOS TALLOS DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

Sensor	Tamaño de hojas del sistema automatizado (cm)								Promedio de crecimiento
	Tallo	Hoja 1	Hoja 2	Hoja 3	Hoja 4	Hoja 5	Hoja 6	Hoja 7	
H1B	8	33	32	33	32	17	N/P	N/P	29.4
H2B	8	35	32	29	16	12	N/P	N/P	24.8
H3B	6	34	32	3	23	N/P	N/P	N/P	23
H4B	7	33	31	30	26	24	20	21	26.43

C. Costo total del proyecto

El proyecto realizado tiene un costo total de \$89.24 dólares. Este monto se encuentra dividido en dos partes, las cuales se describen en las tablas 7 y 8. La tabla 7 corresponde al costo de los materiales empleados en la elaboración de ambos sistemas de riego, los cuales suman \$65.25 dólares. Por su parte, la tabla 8 incluye los materiales adicionales que fueron necesarios para las muestras, con un total de \$23.99 dólares.

TABLA 7
COSTO DEL SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

Materiales de los sistemas de riego	Unidades	Costo
Bombas de agua	5	\$ 5.64
Sensor de humedad capacitivo	10	\$ 12.42
Modulo relé de 4 entradas	2	\$ 5.76
ESP32 Devkit V1 30P	2	\$ 25.40
Sensor ultrasonido 5V	1	\$ 1.75
Jack y pugs con borneras	2	\$ 0.96
Conector header hembra	4	\$ 1.47
Placa circuito impreso perforada	2	\$ 1.41
Placa de alimentación para ESP32 30P	2	\$ 6.77
Borne de conexión de 12 pines macho	2	\$ 3.67
Total		\$ 65.25

TABLA 8
COSTO DE LOS MATERIALES ADICIONALES

Materiales auxiliares	Costos
Maceta y abono	\$ 5.08
Manguera	\$ 2.26
Cebollinos	\$ 1.13
Balde de 8L	\$ 1.98
Caja de paso	\$ 1.41
Cable #20AWG	\$ 4.23
Silicona	\$ 0.56
Cinta masking	\$ 0.71
Plumón indeleble	\$ 0.71
Compots	\$ 1.13
Cintillo	\$ 0.56
Cable USB	\$ 1.41
Cargador 12v	\$ 2.82
Total	\$ 23.99

TABLA 9
COSTO TOTAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

Proyecto	Costo
Materiales de los sistemas de riego	\$ 65.25
Materiales auxiliares	\$ 23.99
Total	\$ 89.24

El producto ofrecido por la tienda TopPCB Official Store en AliExpress [19] es un kit de riego automático tipo DIY, diseñado para facilitar el cuidado de plantas en jardines, invernaderos o macetas. Incluye una bomba de agua, un sensor de humedad del suelo, un módulo electrónico en formato SMD y componentes compatibles con placas Arduino. Su funcionamiento se basa en la medición del nivel de humedad: cuando el sensor detecta que el suelo está seco, se activa automáticamente la bomba para regar las plantas, lo que lo convierte en una solución eficiente y práctica con mínima intervención manual. Con un precio aproximado de \$16.37 dólares, este kit ha sido bien recibido por los compradores, acumulando más de 100 ventas y valoraciones positivas debido a su funcionalidad y facilidad de integración en proyectos educativos o domésticos. Sin embargo, hay que considerar que el kit no incluye baterías ni la placa Arduino, siendo esta última fundamental para la programación del sistema. Si se desea incorporar funciones IoT, es necesario añadir un módulo WiFi o, en su defecto, optar por una placa Arduino más moderna con WiFi integrado, como el modelo R4. En la Tabla 10 se detallan los componentes adicionales, se presenta una opción con una placa de desarrollo más avanzada, se comparan los precios del sistema de riego con el sistema presentado; usando Arduino UNO se incrementa el costo en aproximadamente \$3.18 dólares, mientras que con el Arduino R4 se logra un ahorro total de \$22.21 dólares.

TABLA 10
COSTO DEL SISTEMA DE RIEGO CON ARDUINO UNO

Materiales – Sistema 1	Unid.	Costo (\$)	Materiales – Sistema 2	Unid.	Costo (\$)
Kit de bricolaje de autorriego	1	16.37	Kit de bricolaje de autorriego	1	16.37
Broche Tipo T para Batería 9V con Plug	2	0.85	Broche Tipo T para Batería 9V con Plug	2	0.85
Batería 9V Toshiba	1	0.99	Batería 9V Toshiba	1	0.99
Arduino UNO con Atmega328p	2	25.4	UNOR4 Wifi con Cable USB	2	50.79
Módulo ESP-01 ESP8266 Wifi-Serial	2	9.03	Módulo ESP-01 ESP8266 Wifi-Serial	2	9.03
Conector Header hembra	4	1.47	Conector Header hembra	4	1.47
Placa circuito impreso perforada	2	1.41	Placa circuito impreso perforada	2	1.41
Borne de conexión de 12 pines macho	2	3.67	Borne de conexión de 12 pines macho	2	3.67
Bombas de agua	1	1.13	Bombas de agua	1	1.13
Sensor ultrasónico 5V	1	1.75	Sensor ultrasónico 5V	1	1.75
Total		62.07	Total		87.46

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian la eficacia del sistema de riego automatizado basado en IoT para optimizar el uso del recurso hídrico en cultivos de cebollino. En comparación con el método de riego manual, que requirió 2.8 litros distribuidos en cuatro aplicaciones, el sistema automatizado utilizó solo 0.2 litros en dos aplicaciones controladas. Esta diferencia representa una reducción del 92.8 % en el consumo de agua, sin comprometer el desarrollo del cultivo. El sistema logró elevar la humedad del suelo al 95 % en apenas un minuto, aplicando 100 mL cuando los sensores detectaban niveles por debajo del 55 %, lo que demuestra un control eficiente y preciso.

Estos resultados se alinean con estudios previos como el de [10], donde se propuso un sistema de riego inteligente basado en ESP32 para reducir el desperdicio de agua mediante decisiones automatizadas. Sin embargo, en nuestro caso, se logró una respuesta más rápida y una aplicación hídrica más ajustada al requerimiento real del suelo, gracias a un control zonificado y calibrado directamente en campo. Asimismo, a diferencia del estudio de [12], donde el sistema respondía a múltiples variables ambientales y tenía un costo total de US\$110.94, el sistema propuesto en esta investigación logró resultados similares en eficiencia con un costo total de US\$65.25, reafirmando su condición de alternativa económica y accesible para contextos rurales o académicos.

Desde el punto de vista agronómico, aunque el riego manual generó mayor concentración de clorofila en las hojas un posible indicador de densidad nutricional [17], el sistema automatizado favoreció un desarrollo más vigoroso y uniforme, alcanzando longitudes foliares de hasta 32 cm frente a los 26 cm obtenidos con riego manual. Esta diferencia sugiere que el riego automatizado no solo optimiza el recurso hídrico, sino que también mejora el ritmo de crecimiento del cultivo, reduciendo el estrés hídrico y estabilizando las condiciones del entorno.

Además, el análisis económico posiciona favorablemente al sistema desarrollado frente a kits comerciales DIY basados en Arduino UNO o R4. A diferencia de estos, que requieren módulos WiFi-externos y configuraciones adicionales para alcanzar funcionalidad IoT, el sistema basado en ESP32 incluye esta capacidad de forma nativa, reduciendo componentes, consumo energético y complejidad. Frente a soluciones como las presentadas por la empresa Agroponis [7] o las estrategias promovidas por MIDAGRI [8] en zonas como Chavimochic, nuestra propuesta representa una solución frugal, educativa y adaptable a escala doméstica o comunitaria.

En consecuencia, el prototipo desarrollado no solo representa una alternativa frugal y funcional, sino que también es tecnológicamente sostenible en el tiempo debido a sus bajos costos de mantenimiento lo posicionan favorablemente frente a

otras tecnologías similares, reforzando su viabilidad operativa en contextos educativos y comunitarios.

VI.CONCLUSIONES

El análisis realizado demuestra que los objetivos planteados en esta investigación se han cumplido satisfactoriamente. Respecto al objetivo general, que consistía en diseñar e implementar un sistema de riego automatizado basado en IoT para el cultivo de cebollinos, se confirmó que esta solución permite optimizar el uso del recurso hídrico durante el periodo de crecimiento, mediante monitoreo en tiempo real y activación automática según los niveles de humedad del suelo.

En cuanto al primer objetivo específico, se logró comprobar que el sistema automatizado redujo significativamente el consumo de agua en comparación con el riego manual. El sistema aplicó solo 200 mL frente a los 2800 mL usados manualmente, lo que representa una disminución del 92.86 % en el uso hídrico, manteniendo niveles de humedad adecuados y condiciones favorables para el crecimiento del cultivo.

Respecto al segundo objetivo específico, se evidenció que las plantas regadas con el sistema automatizado presentaron un desarrollo más uniforme y mayor longitud promedio de hojas, alcanzando hasta 32 cm, frente a los 26 cm obtenidos con el sistema manual. Esto demuestra que la automatización no solo optimiza el uso del agua, sino que también mejora la eficiencia agronómica del cultivo.

Sin embargo, se reconoce como limitación que los ensayos se realizaron en un entorno controlado con macetas individuales, lo cual no refleja completamente las condiciones de cultivos a gran escala o en exteriores. Además, la dependencia de conexión Wi-Fi y la calibración periódica de sensores podrían afectar el rendimiento del sistema en zonas rurales con infraestructura limitada.

Entre las líneas de mejora futuras se contempla la integración de paneles solares para mayor autonomía energética, el uso de sensores más robustos para condiciones ambientales extremas, y el desarrollo de una interfaz móvil para visualización y control remoto. También se plantea la posibilidad de escalar el sistema a múltiples zonas de riego simultáneo con aprendizaje adaptativo por sensor.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que la aplicación de tecnologías IoT en sistemas de riego automatizados representa una alternativa viable, de bajo costo y eficiente para la agricultura urbana, contribuyendo a la sostenibilidad hídrica y a una producción más resiliente frente a escenarios de escasez.

VI.REFERENCIAS

[1] I. Fertri, "Estrés hídrico en invernaderos: ¿qué es y cómo afecta?," *Fertri Invernaderos*, 22 abr. 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://fertri.com/2024/04/estres-hidrico-invernaderos-que-es-como-afecta-cultivos/>

[2] Seipasa, "Estrés hídrico en las plantas," *Seipasa Blog*. [En línea]. Disponible en: <https://www.seipasa.com/es/blog/estres-hidrico-en-las-plantas/>

[3] R. iAgua, "¿Qué es el estrés hídrico?," *iAgua*, 23 may. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-estres-hidrico>

[4] UNESCO, *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024*. 2024. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659_spa

[5] Food and Agriculture Organization (FAO), "Sustainable Development Goals Data Portal," FAO, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/sustainable-development-goals-data-portal/data/indicators/642-water-stress/es>

[6] CEPLAN, "Impacto del estrés hídrico en la producción agrícola," *Observatorio Nacional de Prospectiva*, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/tg43>

[7] Agropinos, "Sistemas de Riego: Problemas más Comunes," *Blog Agropinos*, 13 feb. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.agropinos.com/blog/como-prevenir-problemas-en-los-sistemas-de-riego>

[8] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), "Problemática," *Gob.pe*. [En línea]. Disponible en: <https://www.midagri.gob.pe/portal/56-sector-agrario/cuencas-y-drenaje/385-problematika>

[9] Netafim, "Products and Solutions," *Netafim Perú*. [En línea]. Disponible en: <https://www.netafim.pe/productos-y-soluciones/>

[10] A. Morchid, R. Jebabra, H. M. Khalid, R. El Alami, H. Qjidaa, y M. O. Jamil, "IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102829, 2024. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102829

[11] A. Tasayco, A. Villanueva, y R. Yauri, "Mechatronic system based on Bluetooth communication with a mobile application for automatic irrigation in greenhouses," *Emerging Science Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 12–24, feb. 2025. doi: 10.28991/ESJ-2025-09-01-02

[12] V. Oguntosin, C. Okeke, E. Adetiba, A. Abdulkareem, y J. Olowoleni, "IoT-Based Greenhouse Monitoring and Control System," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 469–483, ago. 2023. doi: 10.12785/ijcds/140137

[13] I. Fertri, "Tipos de riegos en invernadero: ¿Qué sistema de riego existen?," *Fertri Invernaderos*, 31 mayo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://fertri.com/2024/05/tipos-de-riegos-en-invernadero/#que-es-un-sistema-de-riego>

[14] C. Sembralia, "Tipos de sistemas de riego en invernaderos. Ventajas y modos de uso. Trucos para ahorrar agua y ser eficientes," *Blog Sembralia*, 12 ago. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://sembralia.com/blogs/blog/sistema-de-riego-en-invernaderos>

[15] Cenicaña, "ABC de los sensores de humedad en las labores de riego," 3 jul. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.cenicana.org/abc-de-los-sensores-de-humedad-en-las-labores-de-riego>

[16] Estrella, "Sistemas de riego automatizados para invernaderos," *Agrofacto*, 17 mayo 2024. [En línea]. Disponible en: <https://agrofacto.com/sistemas-de-riego-AUTOMATIZADOS-PARA-INTERNADEROS/>

[17] Sumédico, "5 beneficios del cebollín para la salud," *Sumédico*, 17 oct. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.sumedico.com/vida-sana/cuidado-personal/2018/10/17/beneficios-del-cebollin-para-la-salud-26533.html>

[18] Google Docs, "Código de programación," [En línea]. Disponible en: https://docs.google.com/document/d/1Rk_GPA1Ok2FKtaCYOC-bAOuSP1_J4XYfNfxZA3ol8u8/edit

[19] AliExpress, "Mini bomba de agua RS-150PUMP," [En línea]. Disponible en: https://a.aliexpress.com/_m06adnz

[20] L. E. Ramos, "Midagri ejecuta más de 130 proyectos de riego tecnificado en 19 regiones del Perú", Agropress, 11-jul-2025. [En línea]. Disponible en: <https://agropress.pe/sectores/agricultura/midagri-ejecuta-mas-de-130-proyectos-de-riego-tecnificado-en-19-regiones-del-peru/>