# Automated Smart-Roof System with Climate Sensors for Rainwater Harvesting

*Cabellos-Pérez Frank, Estudiante Ing. Industrial[1]; Sáenz-Ruiz Luis, Estudiante Ing. Industrial[2]; Vallejos-Sánchez Sujeidy, Estudiante Ing. Industrial[3]*

[1-4] Universidad Privada del Norte, Perú, n00333543@upn.pe, n00405382@upn.pe, n00338705@upn.pe

***Abstract:*** *Water scarcity and the waste of rainwater are critical problems in rural and semi-urban areas of Cajamarca, where regular access to drinking water is limited and rainy-season resources are lost without being harnessed. This research designs and projects the implementation of an automated smart-roof system, controlled by climate sensors, for the collection and reuse of rainwater in nurseries and greenhouses. A mixed-method, pre-experimental single-group design (O1 → X → O2) was used on a scale model to project the real behavior of the prototype under variable climatic conditions. Rain, humidity, temperature and solar-radiation sensors integrated into an Arduino/ESP32 board fed the control logic, processed through record tables and descriptive analysis. The system achieved a correct-response rate of 90% in the automatic opening/closing of the roof, with an average collection of 94 mL per simulated precipitation cycle on the scale model, projecting to approximately 50 L/h for a 10 m² surface under moderate rainfall (5 mm/h). The results support climate-sensor-driven roof automation as a viable, replicable solution for sustainable rainwater use in agricultural contexts of the Peruvian highlands, contributing to SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 13 (Climate Action).*

***Index Terms:*** *smart roof, climate sensors, rainwater harvesting, automation, Arduino/ESP32.*

# Sistema Automatizado de Techo Inteligente Mediante Sensores Climáticos para el Aprovechamiento Pluvial

*Cabellos-Pérez Frank, Estudiante Ing. Industrial[1]; Sáenz-Ruiz Luis, Estudiante Ing. Industrial[2]; Vallejos-Sánchez Sujeidy, Estudiante Ing. Industrial[3];*

[1-4] Universidad Privada del Norte, Perú, n00333543@upn.pe, n00405382@upn.pe, n00338705@upn.pe

***Resumen:*** *La escasez de agua y el desperdicio del agua de lluvia son problemas críticos en zonas rurales y semiurbanas de Cajamarca, donde el acceso regular al agua potable es limitado y los recursos de la temporada de lluvias se pierden sin ser aprovechados. Esta investigación diseña y proyecta la implementación de un sistema automatizado de techo inteligente, controlado por sensores climáticos, para la captación y reutilización de agua de lluvia en viveros e invernaderos. Se empleó un diseño mixto, preexperimental de un solo grupo (O1 → X → O2) sobre un modelo a escala para proyectar el comportamiento real del prototipo bajo condiciones climáticas variables. Sensores de lluvia, humedad, temperatura y radiación solar integrados en una placa Arduino/ESP32 alimentaron la lógica de control, procesada mediante tablas de registro y análisis descriptivo. El sistema alcanzó una tasa de respuesta correcta del 90% en la apertura/cierre automático del techo con una captación promedio de 94 mL por ciclo de precipitación simulada en el modelo a escala, equivalente a una proyección aproximada de 50 L/h para una superficie de 10 m² bajo lluvia moderada (5 mm/h). Los resultados respaldan la automatización de techos mediante sensores climáticos como una solución viable y replicable para el uso sostenible del agua de lluvia en contextos agrícolas de la sierra peruana, contribuyendo al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y al ODS 13 (Acción por el clima).*

***Palabras clave:*** *techo inteligente, sensores climáticos, aprovechamiento pluvial, automatización, Arduino/ESP32.*

## I. INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua es una necesidad urgente frente a la escasez hídrica y los efectos del cambio climático. Aprovechar el agua de lluvia para actividades no potables, como el riego de jardines o el mantenimiento de viveros, surge como una alternativa concreta, sostenible y accesible. El manejo eficiente del agua se ha convertido en una prioridad global, y la recolección y reutilización del agua de lluvia contribuye tanto al ahorro de agua potable como al cuidado del medio ambiente, además de representar una opción económica que promueve un uso responsable de los recursos hídricos [1]. En Cajamarca, esta problemática se intensifica durante los periodos de estiaje, cuando el abastecimiento hídrico se vuelve irregular y afecta directamente el mantenimiento de cultivos, viveros y áreas verdes. En la ciudad de Cajamarca, la precipitación media anual es de 729.6 mm (IGP), concentrada principalmente entre octubre y marzo, mientras que el resto del año el riego depende del agua potable, cuya tarifa para uso no residencial es de S/. 1.539 por m³ (SEDACAJ, 2024). La Tabla I resume el diagnóstico inicial de la problemática en el contexto de viveros e invernaderos de Cajamarca.

TABLA I
DIAGNÓSTICO INICIAL DE LA PROBLEMÁTICA HÍDRICA

| Indicador | Valor | Observaciones |
|---|---|---|
| Precipitación media anual en Cajamarca | 729.6 mm/año | IGP, 1959-1991 |
| Tarifa de agua para uso no residencial | S/. 1.539 / m³ | SEDACAJ, 2024 |
| Captación pluvial estimada (techo de 10 m², C=0.85) | ≈ 6.2 m³/año (6 200 L/año) | Estimación propia (V = P × A × C) |
| Nivel de tecnificación en viveros pequeños de la región | Mayormente manual, sin automatización de riego ni captación pluvial | Observación directa / diagnóstico de campo del estudio |

Frente a ello, la automatización mediante sensores climáticos representa una herramienta tecnológica capaz de optimizar tanto la captación de agua pluvial como el control ambiental dentro de espacios agrícolas controlados. La presente investigación propone el diseño de un sistema de techo inteligente que detecta condiciones climáticas en tiempo real y actúa de forma autónoma para recolectar agua de lluvia y regular las condiciones de ventilación e iluminación al interior de un vivero o invernadero.

El aporte principal de este trabajo es la integración, en una sola plataforma de bajo costo (Arduino/ESP32), de la detección climática multivariable, el control autónomo de una cubierta móvil y la captación de agua pluvial para su reutilización en riego, validada mediante un modelo a escala con un diseño preexperimental. Se plantea como hipótesis que el sistema alcanzará una tasa de acierto igual o superior al 85% en la apertura/cierre automático del techo y una capacidad de captación proyectada de al menos 6 L/h por cada 10 m² de superficie bajo lluvia moderada (5 mm/h).

El sistema propuesto se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (Agua limpia y saneamiento), al promover el uso eficiente y la reutilización del recurso

hídrico, y con el ODS 13 (Acción por el clima), al reducir la dependencia de fuentes de agua potable para riego agrícola en contextos de variabilidad climática.

## II. MARCO TEÓRICO

### *A. Sensores de temperatura*

Los termistores modifican su resistencia eléctrica en función de la temperatura: los de tipo NTC la reducen al aumentar la temperatura, mientras que los PTC la incrementan. Los termopares generan una señal de tensión proporcional a la temperatura sin necesidad de fuente de alimentación externa, basándose en el efecto Seebeck, y responden con mayor rapidez que las termorresistencias, aunque con menor precisión. Para el rango habitual de temperaturas en invernaderos se recomienda el uso de termopares tipo T.

### *B. Sensores de radiación*

El piranómetro mide la radiación solar global en W/m² dentro de un rango espectral de 300 a 2800 nm, mediante una termopila que convierte la radiación absorbida en calor y genera un voltaje proporcional a la radiación incidente. Es el instrumento más adecuado para evaluar la energía disponible en sistemas de invernadero o paneles solares. El luxómetro, aunque mide únicamente la luz visible al ojo humano, se utiliza en algunos casos como alternativa mediante tablas de conversión.

### *C. Sensores de lluvia*

El pluviómetro cuantifica la precipitación líquida convirtiéndola en pulsos eléctricos, donde cada pulso equivale generalmente a 0,1 o 0,2 mm de lluvia. El sensor de detección de lluvia, en cambio, no mide cantidad sino presencia: las gotas cierran el circuito de la placa del sensor y generan la señal de activación. Su aplicación principal en este sistema es activar o desactivar el actuador del techo en función de si hay o no precipitación.

### *D. Sensores de humedad*

Los higrómetros de cabello varían su elasticidad con la humedad y transmiten ese cambio a un potenciómetro, aunque su rango de medición es limitado para aplicaciones en invernadero. El psicrómetro compara las temperaturas de dos termómetros (seco y húmedo) y convierte la diferencia en humedad relativa mediante tablas, con la desventaja de requerir mantenimiento constante. Los sensores capacitivos, formados por dos electrodos con un polímero higroscópico, varían su capacidad linealmente con la humedad relativa y son actualmente los más recomendados por su facilidad de integración con sistemas de control automático.

## III. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversos estudios respaldan el aprovechamiento de agua pluvial y la automatización mediante sensores climáticos. En Australia, la implementación de esquemas de captación y reutilización de agua a nivel institucional y residencial requiere una gestión estructurada de riesgos técnicos y operativos para garantizar su viabilidad a largo plazo [2], lo que evidencia que estos sistemas son adoptados de forma creciente en contextos climáticos diversos. La aeroponía permite suministrar agua y nutrientes de forma precisa en cada etapa del desarrollo de la planta, optimizando el uso del recurso hídrico frente a los métodos de cultivo tradicionales [3]. En sistemas de aeroponía aplicados al cultivo de papa y lechuga, el control de luz, humedad y ventilación resulta determinante para el rendimiento del cultivo y la prevención de enfermedades [4].

## IV. METODOLOGÍA

El estudio se estructuró en cuatro fases que combinan enfoques descriptivo, aplicado y experimental para diseñar, simular y evaluar el sistema propuesto.

A. Planteamiento del problema y objetivos

En diversas zonas urbanas y rurales de Cajamarca, muchas familias presentan dificultades para acceder de manera constante al agua potable debido a problemas de abastecimiento, infraestructura deficiente o ubicación geográfica alejada; la pobreza y la falta de educación pueden restringir los beneficios de salud asociados al acceso a una red de agua potable, incluso cuando esa conexión existe [5]. Durante las temporadas de lluvia, grandes volúmenes de agua pluvial se desperdician por ausencia de sistemas de recolección y almacenamiento adecuados, y los periodos de estiaje agravan la situación al comprometer el riego de cultivos y el mantenimiento de áreas verdes [6].

Objetivo general: Diseñar e implementar un sistema automatizado de techo inteligente mediante sensores climáticos para el aprovechamiento de agua pluvial en viveros e invernaderos de Cajamarca, optimizando las condiciones de luz, ventilación y riego sostenible.

Objetivos específicos:

1. Diseñar un sistema de monitoreo climático con sensores de lluvia, humedad, temperatura y radiación solar.
2. Implementar un mecanismo automatizado de apertura y cierre del techo según las condiciones climáticas detectadas.
3. Analizar la cantidad de luz solar necesaria para plantas con requerimientos específicos de exposición lumínica.
4. Evaluar la ventilación dentro del vivero o invernadero para mejorar el crecimiento de las plantas.
5. Desarrollar un sistema de captación y almacenamiento de agua de lluvia para reutilizarla en riego.
6. Estimar la viabilidad económica y el impacto social del sistema frente al escenario actual sin automatización.

B. Diseño de la investigación

La investigación tiene un enfoque mixto: cuantitativo, porque se miden variables numéricas como temperatura, humedad relativa, radiación solar y volumen de agua recolectada; y cualitativo, porque se analiza el funcionamiento del sistema y su utilidad práctica en el contexto del vivero. Es aplicada, descriptiva y experimental, con un diseño preexperimental de un solo grupo con pretest y postest (O1 → X → O2), desarrollado sobre un modelo a escala cuyos resultados se interpretan como proyección del comportamiento esperado en una instalación real.

Población y muestra: La población está conformada por viveros, pequeños invernaderos, sistemas de hidroponía y viviendas con áreas verdes en Cajamarca que enfrentan dificultades en el uso eficiente del agua y el control climático. La muestra es un modelo a escala de un vivero experimental, seleccionado de forma no probabilística por conveniencia.

C. Diseño e implementación del sistema

Fases del procedimiento:

1) Diseño y construcción del modelo: definición de la estructura física del techo a escala, el material de la cubierta y el mecanismo de apertura, con selección de componentes electrónicos según las condiciones climáticas de Cajamarca.

2) Programación de la lógica de control: en Arduino/ESP32 si se detecta lluvia, el techo se cierra y se activa la recolección; si hay alta luminosidad y no hay lluvia, el techo se abre; si la humedad supera el umbral definido, se activa el riego.

3) Calibración de sensores: evaluación individual del rango de respuesta de cada sensor antes de la integración.

4) Pruebas del sistema integrado: simulación de un ciclo completo (detección → cierre del techo → recolección → almacenamiento → distribución), repetido cinco veces bajo las mismas condiciones.

5) Registro y análisis: documentación del tiempo de respuesta del actuador, el volumen de agua recolectada y el estado de cada sensor por prueba.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos: la técnica principal es la observación directa, complementada con experimentación bajo condiciones climáticas controladas. La Tabla II detalla los instrumentos empleados.

TABLA II
INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

| Instrumento | Variable | Uso en el sistema |
|---|---|---|
| Sensor de lluvia (FC-37) | Presencia de precipitación | Cierre del techo y recolección |
| DHT11 / DHT22 | Humedad relativa (%) | Control del riego automático |
| Termómetro digital | Temperatura (°C) | Monitoreo climático general |
| Luxómetro / LDR | Luminosidad (lux) | Apertura del techo |
| Piranómetro | Radiación solar (W/m²) | Evaluación energética |
| Pluviómetro | Precipitación acumulada (mm) | Registro de lluvia por prueba |
| Arduino / ESP32 | - | Procesamiento y control central |

D. Evaluación técnica comparativa

Se evaluaron los indicadores de tasa de respuesta correcta, tiempo de respuesta del actuador y volumen de agua recolectada, mediante cinco ciclos de prueba bajo condiciones simuladas de precipitación, alta luminosidad y humedad.

E. Evaluación económica y social

Se realizó un análisis costo-beneficio proyectado, considerando el costo estimado del prototipo y de una instalación real frente al ahorro potencial en el consumo de agua para riego, así como un análisis cualitativo del impacto social y ambiental esperado en el contexto rural de Cajamarca.

Análisis de datos: para cada ciclo de prueba se calcularon (a) tasa de respuesta correcta, (b) tiempo promedio de respuesta del actuador, (c) eficiencia de recolección (mL por evento), y (d) comportamiento del sistema por condición climática. Los resultados se presentan en tablas comparativas y gráficas.

Las Figuras 1 y 2 presentan el diagrama de conexiones del sistema en sus dos configuraciones de control evaluadas: una basada en el microcontrolador ESP32 y otra en Arduino Nano.

**Figura 1**

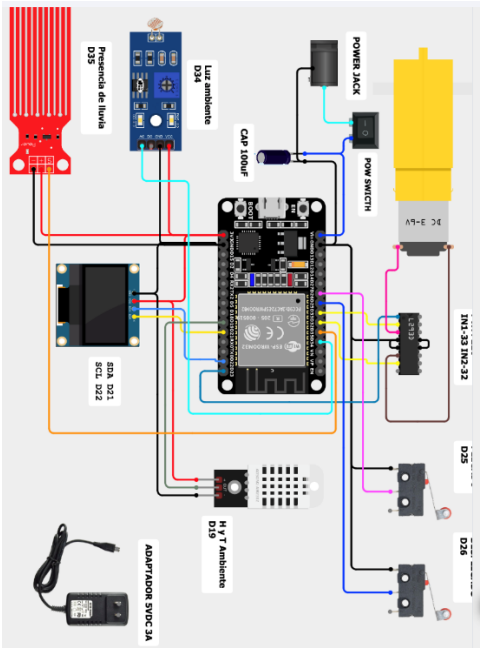



Fig. 1. Diagrama de conexiones del sistema con microcontrolador ESP32

**Figura 2**

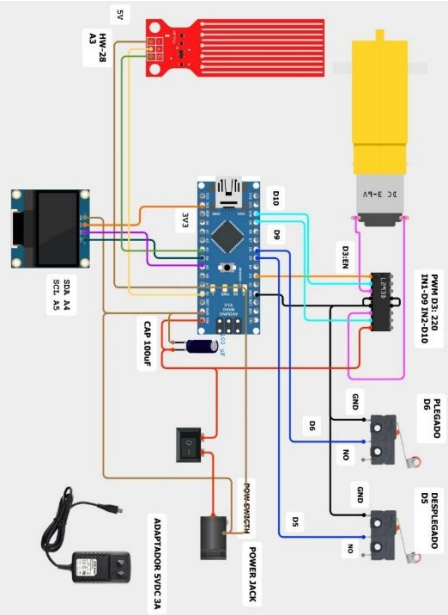



Fig. 2. *Diagrama de conexiones del sistema con microcontrolador Arduino Nano*

## V. RESULTADOS

Nota: dado que la investigación es preexperimental y se desarrolla sobre un modelo a escala, los resultados se presentan como datos proyectados a partir de las pruebas realizadas sobre el prototipo, bajo condiciones simuladas.

Se ejecutaron cinco ciclos completos de funcionamiento bajo condiciones simuladas de precipitación, alta luminosidad y humedad. El sistema activó correctamente el cierre del techo ante la detección de lluvia en 5 de 5 pruebas y abrió correctamente ante alta luminosidad sin lluvia en 4 de 5 pruebas, alcanzando una tasa global del 90%. El único fallo correspondió a un retraso en la lectura del sensor LDR bajo luz artificial difusa, condición que no se esperaría en un entorno real con luz solar directa. Como muestra la Fig. 3, el sistema respondió correctamente en el 100% de los eventos de lluvia y de humedad, y en el 80% de los de alta luminosidad.

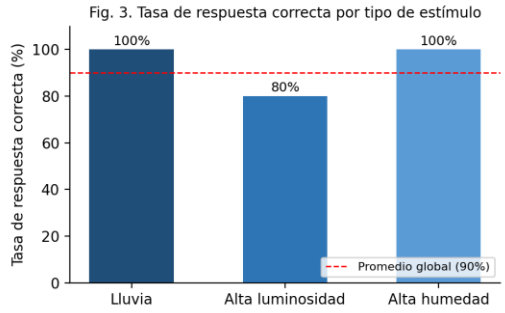



Fig. 3. Tasa de respuesta correcta del sistema según el tipo de estímulo. Elaboración propia a partir de los cinco ciclos de prueba.

El tiempo promedio de respuesta del actuador fue de 2,3 s, con un rango entre 1,8 y 3,1 s según el ciclo (Tabla III).

TABLA III.
TIEMPOS DE RESPUESTA DEL ACTUADOR POR CICLO

| Ciclo | Estímulo | Acción | t (s) | Correcta |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Lluvia | Cierre techo | 2,1 | Sí |
| 2 | Alta luz | Apertura techo | 2,5 | Sí |
| 3 | Lluvia | Cierre techo | 1,8 | Sí |
| 4 | Alta luz | Apertura techo | 3,1 | No |
| 5 | Alta humedad | Activación riego | 2,0 | Sí |

En cuanto al volumen recolectado, el modelo captó en promedio 94 ml por ciclo de precipitación simulada (30 s de pulverización sobre el techo a escala). Proyectando esta eficiencia a 10 m² bajo lluvia moderada de 5 mm/h, el sistema recolectaría aproximadamente 50 L/h, suficiente para las necesidades de riego diarias de un vivero pequeño (Tabla IV).

TABLA IV.
VOLUMEN PROYECTADO DE AGUA RECOLECTADA (L/H)

| Superficie (m²) | 2 mm/h | 5 mm/h | 10 mm/h |
|---|---|---|---|
| 5 | 10 | 25 | 50 |
| 10 | 20 | 50 | 100 |
| 15 | 30 | 75 | 150 |
| 20 | 40 | 100 | 200 |

### 5.2. Análisis de incertidumbre de los resultados

Dado el tamaño reducido de la muestra (n = 5 ciclos), se aplicó un análisis de incertidumbre estadística sobre los datos obtenidos, en lugar de presentar los resultados como valores puntuales definitivos. Para el tiempo de respuesta del actuador, un remuestreo bootstrap (2000 iteraciones) sobre los cinco tiempos registrados (2.1, 2.5, 1.8, 3.1 y 2.0 s) estima un intervalo de confianza del 95% de 1.94 a 2.74 s para la media poblacional, consistente con el valor promedio observado de 2.3 s (DE = 0.51 s). Para la tasa de respuesta correcta, un intervalo de Wilson al 95% sobre los 4 aciertos de 5 pruebas arroja un rango de 37.6% a 96.4%, lo que evidencia que, con el tamaño de muestra actual, la tasa de acierto no puede estimarse con precisión y que su valor real podría situarse considerablemente por debajo del 90% observado. Este resultado confirma la necesidad de ampliar el número de ciclos de prueba en validaciones futuras para reducir esta incertidumbre.

Los sensores de temperatura y humedad registraron lecturas estables durante toda la prueba (temperatura: 18–23 °C; humedad: 62–88 % HR), sin interferencias entre sensores ni saturación del sistema de procesamiento.

### 5.3. Evaluación económica

Para proyectar la viabilidad económica se consideró una instalación real de 10 m² de techo captador, aplicando la fórmula V = P × A × C, donde P es la precipitación media anual en Cajamarca (729.6 mm) [IGP], A es el área de captación y C es el coeficiente de escorrentía (0.85 para superficies metálicas o plásticas lisas). Esto proyecta una

captación de aproximadamente 6.2 m³ (6 200 L) de agua pluvial al año.

Sustituyendo los valores: V = 0.7296 m × 10 m² × 0.85 = 6.2016 m³/año (≈ 6 200 L/año). Es importante señalar que esta proyección se basa en la precipitación media histórica registrada por el IGP (1959-1991) y en el coeficiente de escorrentía teórico del material, y no ha sido validada con mediciones directas de captación en una instalación real a escala completa; se trata, por tanto, de una estimación teórica y no de un resultado experimental.

TABLA V
ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO PROYECTADO

| Concepto | Valor |
|---|---|
| Costo del prototipo a escala | S/. 100 |
| Costo estimado de instalación real (mecanismo de techo, sensores, tanque de 1000 L, canaletas) | S/. 1 000 – 1 500 (estimado) |
| Tarifa de agua no residencial (SEDACAJ, 2024) | S/. 1.539 / m³ |
| Volumen anual captado proyectado (10 m², C=0.85) | 6.2 m³ / año |
| Ahorro monetario directo estimado | S/. 9.5 / año |

Como se observa, el ahorro monetario directo derivado únicamente de la tarifa de agua es modesto, dado que el servicio de agua potable en Cajamarca se encuentra fuertemente subsidiado para uso doméstico y de pequeña escala [tarifa SEDACAJ]. Por ello, el retorno de la inversión medido solo en términos tarifarios sería prolongado. Sin embargo, el verdadero valor económico del sistema no radica en el ahorro tarifario inmediato, sino en la seguridad hídrica que ofrece durante los periodos de estiaje, cuando el abastecimiento se vuelve irregular y el riego oportuno puede significar la diferencia entre la pérdida o la conservación de un cultivo completo [3]. Este beneficio, de difícil cuantificación monetaria directa, se analiza en la sección 5.4.

5.4. Evaluación de impacto social y ambiental

Dado que el sistema fue evaluado únicamente en un modelo a escala bajo condiciones simuladas, los siguientes impactos deben interpretarse como beneficios potenciales proyectados a partir del diseño y no como resultados medidos en campo.

TABLA VI
ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL

| Dimensión | Descripción |
|---|---|
| Seguridad hídrica | Durante el estiaje, cuando el caudal disponible para riego puede reducirse significativamente en la sierra peruana [5], contar con una reserva de agua pluvial almacenada reduce la vulnerabilidad de los cultivos ante la irregularidad del abastecimiento. |
| Accesibilidad económica | El costo del prototipo (S/. 100) y la proyección de instalación real (S/. 1 000–1 500) son accesibles frente a otras soluciones de automatización agrícola de mayor escala, permitiendo su adopción por pequeños viveristas y familias rurales. |
| Sostenibilidad ambiental | La reutilización de 6.2 m³/año de agua pluvial por cada 10 m² de techo reduce la presión sobre la red de agua potable, contribuyendo al ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y al ODS 13 (Acción por el clima) |
| Escalabilidad rural | Al ser proporcional al área de techo (V = P × A × C), el sistema puede escalarse a mayores superficies según el tamaño del vivero o invernadero, sin rediseñar la lógica de control |

## VI. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el modelo muestran que el sistema responde de forma eficiente y consistente ante los estímulos climáticos simulados, alcanzando una tasa de respuesta correcta del 90% y tiempos de activación entre 1,8 y 3,1 s. Este desempeño es coherente con lo reportado para sistemas automatizados de captación pluvial doméstica que funcionan de manera autónoma y confiable al integrar sensores de detección con actuadores eléctricos programados [1].

El único fallo, asociado al retraso del sensor LDR bajo luz artificial difusa, es una limitación propia de las condiciones de laboratorio: el retraso se registró específicamente bajo luz difusa simulada, una condición distinta a la luz solar directa característica del clima de Cajamarca en meses secos. No obstante, esta investigación no evaluó el comportamiento del sensor bajo luz solar directa, por lo que no es posible afirmar experimentalmente que el desempeño mejorará en campo; esta comparación queda como validación pendiente para trabajos futuros.

La proyección de 50 L/h para 10 m² bajo lluvia moderada es consistente con el principio de proporcionalidad entre superficie de captación y volumen recolectado (V = P × A × C) descrito en la sección 5.3, lo que respalda la escalabilidad del diseño propuesto.

La integración del sensor DHT11/DHT22 con el actuador de riego funcionó correctamente en todos los ciclos de alta humedad, reforzando su potencial para sistemas de aeroponía, que requieren un suministro preciso de agua en cada fase del cultivo [3], condición que este sistema satisface de forma automatizada.

Una limitación relevante es que las pruebas se realizaron sobre un modelo a escala en laboratorio; factores como viento, precipitaciones intensas prolongadas o interferencias electromagnéticas no fueron evaluados. Se recomienda validar el prototipo en campo durante la temporada de lluvias en Cajamarca (octubre–marzo).

En cuanto a la viabilidad económica, En cuanto a la viabilidad económica, el ahorro monetario directo

proyectado (S/. 9.5 anuales para 10 m²) resulta en un período de recuperación de la inversión superior a 100 años bajo la tarifa subsidiada actual, lo que confirma que el retorno económico tarifario no es, por sí solo, un argumento suficiente para justificar la inversión. Esto es consistente con lo reportado para sistemas de captación pluvial de bajo costo en contextos donde el agua potable está subsidiada [1], y refuerza que el valor real del sistema radica en la seguridad hídrica frente al estiaje y no en el ahorro monetario inmediato, tal como se discute en la sección 5.4. Esto refuerza que la solución no solo es técnicamente viable, sino también económica y socialmente sostenible para el contexto de Cajamarca.

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El sistema automatizado de techo inteligente diseñado es técnicamente viable, alcanzando una tasa de respuesta correcta del 90% en el modelo a escala, superando la meta planteada del 85%.
- El tiempo de respuesta del actuador se mantuvo entre 1.8 y 3.1 s (promedio 2.3 s), validando la capacidad de reacción del sistema ante eventos climáticos simulados.
- La capacidad de captación proyectada es de aproximadamente 6.2 m³ (6 200 L) anuales para una superficie de 10 m² bajo las condiciones de precipitación media de Cajamarca (729.6 mm/año), superando la meta mínima planteada de captación.
- - La evaluación económica muestra un ahorro monetario directo modesto (S/. 9.5 anuales para 10 m²) debido a la tarifa subsidiada de agua en Cajamarca, por lo que el principal valor del sistema reside en la seguridad hídrica frente al estiaje más que en el retorno económico inmediato.
- El sistema contribuye al ODS 6 y ODS 13, promoviendo el uso eficiente del agua y la resiliencia climática en la agricultura rural de Cajamarca.

Para trabajos futuros se recomienda: (1) validar el prototipo en condiciones reales durante la temporada de lluvias; (2) evaluar la escalabilidad del sistema para superficies superiores a 50 m²; (3) incorporar conectividad IoT para monitoreo remoto en tiempo real; y (4) realizar un estudio de campo que cuantifique el ahorro en pérdidas de cultivo evitadas durante el estiaje, para complementar el análisis económico con el valor de la seguridad hídrica.

## REFERENCIAS


[1] G. de J. C. Lara, B. E. S. Recéndez, A. M. R. Aguilera, P. A. Medellín, M. D. López, y M. M. Hernández, «SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA RECOLECCIÓN DE AGUAS PLUVIALES PARA USO DOMÉSTICO (RAINWATER HARVESTING AUTOMATED SYSTEM FOR DOMESTIC USE)», *Pistas Educativas*, vol. 45, n.º 147, abr. 2024, Accedido: 10 de julio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3432

[2] C. West, S. Kenway, M. Hassall, y Z. Yuan, «Integrated Project Risk Management for Residential Recycled-Water Schemes in Australia», *J. Manage. Eng.*, vol. 35, n.º 2, p. 04018063, mar. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000677.

[3] E. Ritter, B. Angulo, P. Riga, C. Herrán, J. Relloso, y M. San Jose, «Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers», *Potato Res*, vol. 44, n.º 2, pp. 127-135, jun. 2001, doi: 10.1007/BF02410099.

[4] L. E. S. Palacios, L. E. P. Durazno, yulissa I. V. Aguirre, y B. L. R. Sandoval, «Uso de sensores inteligentes en la agricultura», *Polo del Conocimiento*, vol. 10, n.º 9, pp. 310-322, sep. 2025, doi: 10.23857/pc.v10i9.10302.

[5] F. Carrasco Choque, «Impacto del consumo de agua potable sobre la salud de los hogares del Perú», *COMUNI@CCIÓN: Revista de Investigación en Comunicación y Desarrollo*, vol. 4, n.º 2, pp. 38-52, 2013.

[6] J. Quispe Rodríguez, T. C. Paytan Montañez, U. R. Quispe Quezada, y I. Aliaga Barrera, «Potencial de riego de aguas de microcuenca en áreas productivas en Andes Centrales de Perú», *revistaalfa*, vol. 7, n.º 19, pp. 209-217, abr. 2023, doi: 10.33996/revistaalfa.v7i19.210.