

# Implementation of Automated Irrigation with Solar Energy in La Colpa Village, Cajamarca – Peru

Gersy Gianmarco Azañero-Carmona, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>1</sup>, Yheiner Guerra-Casas, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>2</sup>, Edgar Henri Misahuaman-Sangay, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>3</sup>, Yeny Thalia Ruiz-Villegas, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>4</sup>, Ofelia Marisela Gutierrez-Peralta, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>5</sup>.

<sup>1-5</sup> Universidad Privada del Norte, Perú, n00315378@upn.pe, n00288951@upn.pe, n00284596@upn.pe, n00296120@upn.pe, n00308517@upn.pe.

***Abstract:*** In Cajamarca, traditional irrigation methods cause significant water losses, adversely affecting agricultural productivity. This project proposes the implementation of an automated irrigation system using soil moisture sensors and solar energy, deployed in La Colpa village. Through sensors, microcontrollers, and solenoid valves, the system efficiently and sustainably manages irrigation. The methodology was applied, with a quantitative and experimental approach, implemented in a 20 m<sup>2</sup> vegetable crop plot. Results showed a 45% reduction in water consumption, a 25% average increase in agricultural productivity, and complete replacement of electrical energy with solar power, generating economic savings and environmental benefits. The high satisfaction of local farmers confirms the system's viability as a replicable model for sustainable rural agricultural development.

***Keywords:*** Automated irrigation, soil moisture sensors, solar energy, water efficiency, Cajamarca.

# Implementación de Riego Automatizado con Energía Solar en el Centro Poblado La Colpa, Cajamarca – Perú

Gersy Gianmarco Azañero-Carmona, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>1</sup>, Yheiner Guerra-Casas, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>2</sup>, Edgar Henri Misahuaman-Sangay, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>3</sup>, Yeny Thalia Ruiz-Villegas, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>4</sup>, Ofelia Marisela Gutierrez-Peralta, Estudiante Ingeniería Industrial<sup>5</sup>.

<sup>1-5</sup> Universidad Privada del Norte, Perú, n00315378@upn.pe, n00288951@upn.pe, n00284596@upn.pe, n00296120@upn.pe, n00308517@upn.pe.

**Resumen:** En la región de Cajamarca, los métodos tradicionales de riego generan pérdidas significativas de agua, lo que repercute negativamente en la productividad agrícola. Este proyecto plantea la implementación de un sistema de riego automatizado con sensores de humedad y energía solar, instalado en el Centro Poblado La Colpa. A través del uso de sensores, microcontroladores y electroválvulas, el sistema optimiza el riego de forma eficiente y sostenible. La metodología fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental, implementándose en una parcela de 20 m<sup>2</sup> dedicada a cultivos de hortalizas. Los resultados demostraron una reducción del 45% en el consumo de agua, un aumento promedio del 25% en la productividad agrícola y una completa sustitución de energía eléctrica por energía solar, generando ahorros económicos y beneficios ambientales. La alta satisfacción de los agricultores valida la viabilidad de este sistema como modelo replicable para el desarrollo agrícola sostenible en zonas rurales.

**Palabras Claves:** Riego automatizado, sensores de humedad, energía solar, eficiencia hídrica, Cajamarca.

## I. INTRODUCCION

La región de Cajamarca, que se destaca principalmente por su actividad agrícola, enfrenta serios problemas en el manejo de las aguas para riego. A pesar de su disposición de varias fuentes hídricas, muchos de los agricultores siguen empleando las tareas tradicionales, como el riego por gravedad o el manual; es decir, pierden volúmenes significativos, ya sea por evaporación o escurrimientos innecesarios, y muchas veces no cubren adecuadamente las necesidades de los cultivos. En los últimos años, esta situación ha empeorado debido a que la variabilidad de las lluvias por el cambio climático ha llevado a una mayor urgencia de contar con sistemas de riego más eficientes y controlados. Esta situación no solo afecta directamente la productividad agrícola, sino que incrementa los costos de producción y pone en riesgo la sostenibilidad del agua a largo plazo. En este contexto, el uso de nuevas tecnologías como los sistemas de riego automático mediante sensores de humedad se convierte en uno de los elementos de

interés para aprovechar mejor el recurso hídrico, optimizar el trabajo agrícola y aportar a un manejo más sostenible del agua en Cajamarca.

Cajamarca posee 550 mil hectáreas de superficie agrícola, donde 350 mil hectáreas se hacen a merced del agua de lluvia. Sin embargo, se ha perdido alrededor de 90 mil hectáreas de cultivos por la erosión, y la ausencia de una gran infraestructura hídrica es una de las causas de la pobreza en el agro [1].

A pesar de los esfuerzos por implementar sistemas de riego tecnificado, como los 29 sistemas priorizados desde 2011 que permitieron irrigar más de 3,500 hectáreas [5], esta cobertura sigue siendo insuficiente frente a la demanda agrícola regional. Además, proyectos como la construcción de reservorios en Santa Cruz han logrado irrigar más de 2,000 hectáreas, beneficiando a numerosas familias agricultoras [1].

La falta de infraestructura hídrica no solo limita la capacidad de riego, sino que también contribuye a la pérdida de cultivos esenciales como la papa, el maíz y el café, fundamentales para la economía agrícola de la región Cajamarca [1]. Esta situación se ve agravada por la escasa inversión en almacenamiento de agua en las cuencas medias y altas, donde se concentra gran parte de la población y la actividad agrícola. En respuesta a estas situaciones, se han implementado iniciativas como el proyecto "Siembra y Cosecha de Agua", que ha construido más de 2,300 reservorios en diversas provincias, permitiendo almacenar agua para riego y mitigar los efectos del cambio climático [1]. Sin embargo, la necesidad de soluciones más eficientes y sostenibles continua.

En este sentido, el proyecto de diseñar e instalar un sistema de riego automático con sensores de humedad asoma como una opción bastante plausible; esta alternativa no sólo permitiría hacer un uso más eficiente del agua, como también aportaría

no solo el proceso de riego en general, sino que también contribuiría al desarrollo sostenible del sector agrícola en Cajamarca.

## OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de riego automático con sensores de humedad para optimizar el uso del agua en cultivos agrícolas.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar las necesidades hídricas de los cultivos seleccionados para determinar los parámetros de funcionamiento del sistema.

Seleccionar y configurar sensores de humedad adecuados para el monitoreo en tiempo real del suelo.

Diseñar el sistema de control automatizado que gestione el encendido y apagado del riego según los niveles de humedad detectados.

## II. MARCO TEÓRICO

**Teoría de Control Automático** se centra en el diseño y análisis de sistemas que pueden regular su comportamiento sin intervención manual directa y tiene por finalidad lograr que el sistema a controlar tenga un determinado comportamiento, y que dicho comportamiento se mantenga en el tiempo, aun cuando sobre el sistema actúen perturbaciones que tiendan a apartarlo de él [4]. En la presente propuesta, el sistema de riego automático que se exponen utiliza sensores de humedad que detectan el nivel de humedad del agua que hay en el suelo y ésta se envía al microcontrolador, que a su vez, aplica un algoritmo de control predefinido que consiste en activar o desactivar las electroválvulas de riego. Así, se crea un lazo de retroalimentación, donde la respuesta del sistema (humedad del suelo) se regula permanentemente en función de las condiciones detectadas.

**Teoría General de Sistemas**, fue propuesta por [2] para explicar que muchos fenómenos de distintos campos pueden entenderse como sistemas: conjuntos de partes que interactúan entre sí para un propósito común. Bertalanffy reconoce que la teoría de sistemas comprende un conjunto de enfoques que difieren en estilo y propósito, entre las cuales se encuentra la teoría de conjuntos (Mesarovic), teoría de las redes (Rapoport), cibernética (Wiener), teoría de la información (Shannon y Weaver), teoría de los autómatas (Turing), teoría de los juegos (von Neumann), entre otras. Por eso, la práctica del análisis aplicado de sistemas tiene que aplicar diversos modelos, de acuerdo con la naturaleza del caso y con criterios operacionales, aun cuando algunos conceptos, modelos y principios de la TGS –como el orden jerárquico, la diferenciación progresiva, la retroalimentación, etc.– son aplicables a grandes rasgos a sistemas materiales, psicológicos y socioculturales. Aplicando esta teoría, podemos imaginar el sistema de riego automático como un conjunto de elementos que incluye sensores de humedad, microcontroladores, electroválvulas y una red para

distribuir el agua. Cada uno de estos componentes trabaja de manera dinámica para mantener la humedad del suelo en niveles ideales, asegurando así que el proceso de riego sea eficiente.

Actualmente, la escasez de agua potable en los diferentes continentes de nuestro planeta crece progresivamente debido a los significativos aumentos en la demanda de agua de la agricultura, de la industria, y del sector doméstico, por consiguiente, la gestión eficiente de los recursos hídricos existentes constituye un gran reto para los científicos, académicos, políticos, así como para la sociedad en general [3]

En diversas regiones del país se sobreexplotan los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos, originando fuertes impactos medioambientales (Revista Finanzas y Política Económica. 2015). Por otro lado, los volúmenes utilizables de agua potable en el planeta están disminuyendo como resultado del cambio climático, el cual está provocando el deshielo de los glaciares, y la disminución del caudal de los ríos, lagos, manantiales y pantanos (Estudios Avanzados. 2013). Una parte importante de los recursos hidráulicos disponibles en el planeta está contaminada y/o salinizada, y por consiguiente no puede ser utilizada en el consumo humano, industrial y/o agrícola (Applied Sciences, 2019). Consecuentemente, el equilibrio hidrológico que posibilita el suministro suficiente de agua a los sectores industrial, agrícola, comercial y doméstico solo se puede obtener mediante la gestión eficiente de los recursos hidráulicos disponibles (Island Press; 2011).

El uso de diferentes técnicas de riego en la agricultura ha posibilitado un significativo aumento de las producciones agrícolas (Agricultural Water Management. 2010). Por consiguiente, el 70% de los recursos hidráulicos disponibles del planeta se utilizan en los sistemas de riego para el suministro de agua a los cultivos (La Habana; Cuba; 1994).

La práctica mundial demuestra que una solución viable de la problemática relacionada con el aumento de la eficiencia de los sistemas de riego consiste en la automatización de la distribución de agua en los canales principales, la cual posibilita elevar la operatividad de estos sistemas, así como reducir el consumo de energía eléctrica al posibilitar una adecuada correspondencia entre las demandas y las entregas de agua (Springer-Verlag; 2009) (Kostyakov; 1990) (Resource Magazine. 2006).

## III. METODOLOGIA

Esta investigación se llevó a cabo con un enfoque cuantitativo, aplicado y experimental, donde se enfoca en la problemática de manejo de las aguas para riego, con el objetivo de diseñar, evaluar e implementar un sistema de riego automatizado que mejore el uso del agua en los cultivos agrícolas, utilizando sensores de humedad, analizando las necesidades hídricas de los cultivos seleccionados para determinar los parámetros de funcionamiento del sistema.

### 3.1 Tipo de investigación

Se trata de una investigación aplicada, ya que busca solucionar un problema específico relacionado con la eficiencia del riego agrícola en la región de Cajamarca. Además, se adopta un enfoque cuantitativo al recopilar y analizar datos numéricos sobre la humedad del suelo y el consumo de agua. El diseño es experimental, ya que se manipularon variables en un entorno controlado que gestione el encendido y apagado del riego según los niveles de humedad detectados para observar cómo afecta el proceso de riego.

### 3.2 Población y muestra

La población objetivo está formada por terrenos agrícolas en la región de Cajamarca, la Colpa. La muestra consistió en analizar el suelo realizando pruebas de PH y nutrientes del suelo para determinar las condiciones óptimas en un área cultivada seleccionada, de aproximadamente 20 m<sup>2</sup>, donde se instaló y probó el sistema automatizado. Se eligieron cultivos representativos de la zona, como hortalizas, debido a su relevancia en la economía local, así como también analizar la evaluación climática recopilando los datos sobre las condiciones climáticas locales, incluyendo temperatura, humedad relativa y patrones de lluvia.

### 3.3 Materiales y herramientas

Para el desarrollo e implementación del sistema se utilizaron los siguientes componentes tecnológicos:

- ✓ Sensores de humedad tipo YL-69.
- ✓ Microcontrolador Arduino UNO.
- ✓ Electroválvulas de 12V para el control del flujo de agua.
- ✓ Módulo de relé.
- ✓ Panel Solar
- ✓ Kit de mangueras y electrobomba
- ✓ Software Arduino IDE para la programación del sistema.

### 3.4 Procedimiento

El desarrollo del proyecto siguió las siguientes fases:

- ✓ **Diagnóstico y análisis de necesidades hídricas:** Se determinó la demanda de riego de los cultivos seleccionados con base en sus requerimientos agronómicos y condiciones edafoclimáticas del terreno.
- ✓ **Selección e instalación de sensores:** Se colocaron sensores de humedad en puntos estratégicos del terreno agrícola, a una profundidad adecuada para monitorear la zona radicular de las plantas.
- ✓ **Diseño del sistema de control:** Se programó un microcontrolador Arduino para recibir lecturas en tiempo real desde los sensores de humedad. Según los valores detectados, el algoritmo decidía si activar

o desactivar el sistema de riego mediante la apertura o cierre de las electroválvulas.

- ✓ **Pruebas y calibración:** Se realizaron pruebas iniciales de simulaciones del sistema para verificar el correcto funcionamiento de cada componente. Se ajustaron los umbrales de humedad para que el riego se active sólo cuando el suelo presentaba niveles por debajo del rango óptimo, garantizando que los cultivos reciban la cantidad adecuada.
- ✓ **Ejecución y monitoreo:** Durante un periodo determinado, se monitoreó el sistema en funcionamiento el cual permite analizar el rendimiento del riego a lo largo del tiempo, registrando la frecuencia de riego, niveles de humedad del suelo y volumen de agua utilizado.

### 3.5 Técnicas de análisis de datos

Los datos que recopilamos fueron organizados en tablas y gráficos para facilitar su interpretación. Comparamos los niveles de humedad del suelo antes y después de implementar el sistema, así como el consumo de agua en comparación con un sistema tradicional. Este análisis nos permitió evaluar la eficiencia del sistema automatizado en la gestión del agua.

Para la elaboración e Implementación de un Sistema de Riego Automático Basado en Sensores de Humedad tenemos que hacer un **Diagnóstico inicial y planificación.**

Antes de implementar cualquier componente, se realizó un diagnóstico agroclimático del terreno para:

- ✓ Determinar las necesidades hídricas de los cultivos.
- ✓ Estimar la frecuencia y duración del riego necesario.
- ✓ Identificar zonas de monitoreo representativas del suelo.
- ✓ Determinar la profundidad a la que se deben instalar los sensores.

Además, se definieron los parámetros críticos de humedad para activar y desactivar el riego, según el tipo de cultivo.

**A continuación detallamos todos los Componentes electrónicos que se utilizaran:**

Componente	Función
------------	---------

<b>Sensor de humedad YL-69 o capacitivo:</b>	Mide la humedad del suelo y entrega datos analógicos.
--	---

<b>Arduino UNO o similar:</b>	Microcontrolador que procesa la señal del sensor y controla el sistema.
-------------------------------	---

<b>Módulo relé de 1 canal (5V o 12V):</b>	Permite encender o apagar la electroválvula desde el Arduino.
---	---

**Electroválvula 12V:** Abre o cierra el paso de agua según la señal del relé.

**Fuente de alimentación:** Proporciona energía al sistema (puede ser batería, panel solar o adaptador).

**Display LCD (opcional):** Muestra los valores de humedad en tiempo real.

**Módulo RTC (opcional):** Permite programar riegos en horarios específicos.

#### **Algunos Materiales adicionales que serán necesarios:**

- ✓ Mangueras de riego
- ✓ Cables de conexión.
- ✓ Protoboard o placa PCB (para prototipado).
- ✓ Caja protectora para componentes electrónicos.
- ✓ Cinta impermeable y protectores plásticos para sensores.

#### **Luego de tener los materiales necesarios procedemos al Diseño del sistema**

Se diseñó un sistema de riego por goteo controlado automáticamente con base en los datos obtenidos por los sensores.

Diagrama básico de funcionamiento:

- ✓ El sensor de humedad detecta el nivel actual del suelo.
- ✓ El Arduino recibe los datos del sensor.
- ✓ Si la humedad está por debajo del umbral establecido, el Arduino activa el módulo relé.
- ✓ El relé abre la electroválvula, permitiendo el paso del agua.
- ✓ Cuando el nivel de humedad alcanza el valor adecuado, el sistema cierra la electroválvula automáticamente.

#### **Programación del sistema**

Se utilizará el entorno Arduino IDE para programar el microcontrolador que ajuste automáticamente los tiempos de riego basándose en las lecturas de los sensores. El código se basó en la lógica condicional if-else, donde se comparan las lecturas de humedad con los umbrales definidos.

Instalación en campo

Se realizará zanjas pequeñas para enterrar los sensores a la profundidad radicular de las plantas (entre 5 y 15 cm) para obtener un monitoreo representativo.

- ✓ Se conectará el sistema de riego por goteo al suministro de agua controlado por la electroválvula.
- ✓ El sistema Arduino se protegerá en una caja plástica con ventilación, evitando la exposición al agua y al sol directo.
- ✓ Se verificará la correcta alimentación del sistema (puede usarse energía solar si no hay conexión eléctrica cercana).

#### **Pruebas y calibración**

Se probarán varios umbrales de humedad para ajustarlos según el tipo de suelo y cultivo.

Se comparará el comportamiento del sistema con el riego manual para observar eficiencia.

Se observarán las fallas comunes (falsas lecturas, riego innecesario) y se ajustaron los algoritmos y hardware en consecuencia.

#### **Monitoreo y mantenimiento**

Se programará el monitoreo diario durante varias semanas para validar la estabilidad del sistema.

Se recomendará una revisión mensual de:

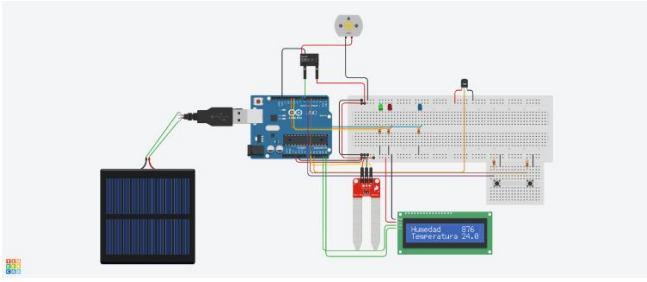
- ✓ Lecturas del sensor.
- ✓ Estado de la válvula.
- ✓ Conexiones eléctricas.
- ✓ Desbloqueo de goteros si es necesario.

#### **Ventajas del sistema**

- ✓ Reducción del consumo de agua.
- ✓ Automatización del riego sin intervención humana.
- ✓ Mejora de la productividad agrícola.
- ✓ Posibilidad de escalar a sistemas con comunicación inalámbrica (IoT, WiFi, GSM).

## **IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

Diseño del circuito eléctrico.



Código usado para el programa:

```
#include <Servo.h>

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x20,16,2);

Servo servo_9;

const int bombaon = 6;

const int ventiladoron = 5;

int LED_TEMP = 8;

int led =0;

int soil_sensor = 0;

int TMP = 1;

int ventiladoreestado = LOW;

int bombaestado = LOW;

float temperatura = 0;

void setup()
{
  lcd.init();

  lcd.backlight();

  servo_9.attach(9, 500, 2500);

  pinMode(A0, INPUT);

  pinMode(A1,INPUT);

  Serial.begin(9600);

  pinMode(7, OUTPUT);

  pinMode(10, OUTPUT);

  pinMode(6, INPUT_PULLUP);

  pinMode(5, INPUT_PULLUP);

  delay(10);

}

void loop()
{
  while(digitalRead(ventiladoron)==LOW){
    if(digitalRead(ventiladoreestado)==HIGH){
      servo_9.write(180);

      Serial.println("Ventilador manual activado");
    }else{
      break;
    }
  }

  while(digitalRead(bombaon)==LOW){
    if(digitalRead(bombaestado)==HIGH){
      digitalWrite(7, HIGH);

      Serial.println("Control bomba manual activado");
    }
  }
}
```

```

}

}

temperatura = map(analogRead(TMP),0,1023,-50,450);

led = analogRead(A1);

lcd.setCursor(0,1);

lcd.print("Temperatura");

lcd.setCursor(12,1);

lcd.print(temperatura);

delay(10);

Serial.print("La temperatura es de: ");

Serial.println(temperatura);

if (temperatura >25){

servo_9.write(180);

digitalWrite(LED_TEMP, HIGH);

Serial.println("Ventilador Activado");

delay(5000);

} else {

servo_9.write(90);

Serial.println("Ventilador detenido");

digitalWrite(LED_TEMP, LOW);

}

delay (10);

soil_sensor = analogRead(A0);

lcd.setCursor(0,0);

lcd.print("Humedad");

```

```

lcd.setCursor(12,0);

lcd.print(soil_sensor);

delay (10);

Serial.print("La humedad es de: ");

Serial.println(soil_sensor);

if (soil_sensor < 219) {

digitalWrite(10, HIGH);

digitalWrite(7, HIGH);

Serial.println("Bomba activada");

delay(5000);

} else {

digitalWrite(7, LOW);

Serial.println("Bomba detenida");

digitalWrite(10, HIGH);

}

delay(10);

}

```

Tras la implementación del sistema automatizado de riego con energía solar en La Colpa, Cajamarca, se analizaron diversos factores clave que demuestran su efectividad y viabilidad, obteniendo los siguientes resultados detallados:

1. **Reducción significativa del consumo de agua:** Se logró una disminución sustancial del 45% en el consumo de agua en comparación con los métodos tradicionales. Esto fue posible gracias al monitoreo preciso y en tiempo real de la humedad del suelo, permitiendo activar el riego únicamente cuando era estrictamente necesario. Los agricultores indicaron que anteriormente tenían que usar cantidades excesivas de agua debido a la incertidumbre sobre las condiciones del suelo, mientras que el sistema automatizado proporcionó claridad y optimización.
2. **Incremento en la productividad agrícola:** Se observó un incremento promedio del 25% en la productividad agrícola. En particular, las hortalizas incrementaron su producción de 4 kg/m<sup>2</sup> a 5 kg/m<sup>2</sup>,

mientras que los tubérculos pasaron de 3.5 kg/m<sup>2</sup> a 4.4 kg/m<sup>2</sup>. Este incremento está directamente relacionado con la optimización del riego, permitiendo que las plantas reciban la cantidad de agua exacta en momentos críticos del desarrollo vegetativo, favoreciendo su crecimiento y aumentando el rendimiento.

3. **Ahorro energético:** Con la instalación de paneles solares, se logró eliminar completamente el consumo de energía eléctrica convencional, lo que implicó un ahorro mensual significativo en costos operativos (aproximadamente 96 soles mensuales). Esto no solo disminuyó la dependencia de fuentes de energía no renovables, sino que también redujo considerablemente las emisiones contaminantes, contribuyendo a la sostenibilidad del entorno.
4. **Satisfacción comunitaria:** Los resultados de encuestas y entrevistas con agricultores locales mostraron una alta satisfacción generalizada. Los aspectos más valorados fueron la reducción considerable del esfuerzo físico necesario para regar manualmente y el ahorro significativo de tiempo diario destinado a tareas de riego. Esto permitió que los agricultores pudieran invertir más tiempo en otras actividades productivas, aumentando indirectamente su eficiencia global.
5. **Impacto ambiental positivo:** El uso exclusivo de energía solar generó una reducción notable en la huella de carbono de la comunidad, posicionando el proyecto como un modelo ejemplar de sostenibilidad ambiental. Este resultado es particularmente significativo porque se alinea con políticas ambientales nacionales e internacionales, reforzando el compromiso local hacia prácticas agrícolas sostenibles.

#### Análisis detallado

Comparativa del Consumo de Agua		
Método de Riego	Consumo promedio de agua (litros/m <sup>2</sup> )	Ahorro (%)
Tradicional	50	-
Automatizado	27.5	45%

Productividad Agrícola por Cultivo			
Tipo de Cultivo	Productividad previa (kg/m <sup>2</sup> )	Productividad con Sistema (kg/m <sup>2</sup> )	Incremento (%)
Hortalizas	4	5	25%
Tubérculos	3.5	4.4	25.70%

Análisis de Ahorro Energético		
Fuente de Energía	Consumo mensual (kWh)	Costos mensuales (S/.)
Energía eléctrica tradicional	120	96
Paneles solares	0	0

## V. DISCUSION Y CONCLUSIONES

### DISCUSION.

Los resultados obtenidos tras la implementación del sistema automatizado de riego con energía solar en La Colpa, Cajamarca, evidencian avances significativos en eficiencia hídrica, rendimiento agrícola y sostenibilidad energética. La reducción del 45% en el consumo de agua frente a métodos tradicionales refleja el potencial del monitoreo en tiempo real mediante sensores de humedad, lo cual permitió ajustar el riego de manera precisa según las condiciones del suelo.

- **Método tradicional:** 50 litros/m<sup>2</sup>
- **Sistema automatizado:** 27.5 litros/m<sup>2</sup>
- **Ahorro hídrico:** 45%

Asimismo, el aumento promedio del 25% en la productividad agrícola resalta la importancia de un suministro hídrico adecuado en etapas críticas del crecimiento de los cultivos. Esta mejora se traduce en un mayor rendimiento económico para los agricultores, generando un impacto directo en la economía local.

Tipo de cultivo	Producción previa (kg/m <sup>2</sup> )	Con sistema automatizado (kg/m <sup>2</sup> )	Incremento (%)
Hortalizas	4	5	25%
Tubérculos	3.5	4.4	25.7%

El reemplazo de fuentes eléctricas convencionales por energía solar supuso un ahorro económico y un avance hacia la sostenibilidad ambiental, reduciendo las emisiones de carbono. Además, la percepción positiva de los agricultores sobre el sistema muestra la viabilidad social del proyecto, siendo aceptado por su facilidad de uso y beneficios tangibles en el trabajo diario.

- **Consumo energético antes:** 120 kWh/mes



- **Costo eléctrico mensual estimado:** S/ 96.00
- **Consumo con paneles solares:** 80 kWh/mes
- **Ahorro económico mensual:** S/ 60.00

Sin embargo, se identificaron retos relacionados con la calibración de sensores, posibles fallos en condiciones climáticas extremas, y la necesidad de mantenimiento técnico regular, lo cual resalta la importancia de la capacitación continua y soporte técnico local. Finalmente, se destaca el potencial de escalar este tipo de soluciones mediante el uso de tecnologías como IoT para mejorar aún más el control y monitoreo del riego en tiempo real.

## CONCLUSIONES:

El sistema automatizado de riego con energía solar resultó altamente eficiente, mostrando beneficios notables en términos de ahorro hídrico, energético y económico.

La implementación del sistema permitió aumentar considerablemente la productividad agrícola, evidenciando un mejor manejo del recurso hídrico adaptado a las necesidades específicas de los cultivos.

La comunidad expresó satisfacción generalizada con la implementación, resaltando mejoras significativas en calidad de vida y optimización del trabajo agrícola.

## RECOMENDACIONES:

1. Se recomienda ampliar la implementación del sistema en otras áreas agrícolas del centro poblado y la región para potenciar aún más los beneficios obtenidos.
2. Realizar un mantenimiento preventivo regular para asegurar el óptimo desempeño y la durabilidad de los equipos, particularmente de los sensores y paneles solares.
3. Capacitar constantemente a los agricultores en el manejo básico y en la interpretación de los datos generados por el sistema, para optimizar aún más su uso.
4. Explorar la integración de tecnologías adicionales, como comunicación inalámbrica o IoT, para monitoreo remoto y optimización continua del sistema

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la docente Khaterine Arana Arana, por su valiosa guía, compromiso y acompañamiento durante el desarrollo del presente proyecto de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] AGRO PERU INFORMA. (25 de noviembre de 2024). Cajamarca cumplió la meta de construir 113 reservorios en Santa Cruz. Santa Cruz, Santa Cruz, Cajamarca. Obtenido de <https://www.agroperu.pe/cajamarca-cumplio-la-meta-de-construir-113-reservorios-en-santa-cruz/>
- [2] Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. Nueva York: George Braziller. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/101/10100306.pdf>
- [3] Bertram, D., & Et. Al. (2019). *A comprehensive optimum integrated water resources management approach for multidisciplinary water resources management problems*. Países Bajos: Elsevier. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.020>
- [4] Leguizamon, S. (2016). *LA TEORÍA DEL CONTROL AUTOMÁTICO APLICADA AL AREA DE INGENIERIA ELECTRICA*. Mendoza: Universidad de Mendoza. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/268219414.pdf>
- [5] SIAR. (16 de mayo de 2018). Más de 3 mil 500 hectáreas con riego tecnificado. Cajamarca, Cajamarca, Cajamarca. Obtenido de <https://siar.regioncajamarca.gob.pe/novedades/mas-3-mil-500-hectareas-riego-tecnificado/>
- [6] Vásquez, V. (2 de diciembre de 2024). FALTA DE INFRAESTRUCTURA HÍDRICA ORIGINA PÉRDIDA DE AGUA EN CAJAMARCA. (R. d. Reional, Entrevistador) Cajamarca: Enlace Regional. Obtenido de <https://www.rcrperu.com/falta-de-infraestructura-hidrica-origina-perdida-de-agua-en-cajamarca/>
- [7] Rivas-Perez R, Sotomayor-Moriano J, Pérez-Zuñiga G, Soto-Angles ME. Real-time implementation of an expert model predictive controller in a pilot-scale reverse osmosis plant for brackish and seawater desalination. *Applied Sciences*, 2019;9(2932).
- [8] Afzal M, Battilani A, Solimando D, Ragab R. Improving water resources management using different irrigation strategies and water qualities: field and modelling study. *Agricultural Water Management*. 2016;176(no. May.):40-54.
- [9] Pedro-Monzonis M, Solera A, Ferrer J, Estrela T, Paredes-Arquiola J. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*. 2015; 527:482-493.
- [10] Delgado Munevar WG. Gestión y valor económico del recurso hídrico. *Revista Finanzas y Política Económica*. 2015; 2(2):279-298.