

Mini-greenhouse with a control and monitoring system based on fuzzy logic for the growth and development of mochero chili plants

Jamer M. Cabanillas-Escurra, Bach.¹, Luis E. Aguilar-Fuentes, Bach.¹, Jair M. Pérez-Aguilar, M.Sc.¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN)-Cajamarca, Perú
n00247890@upn.pe, n00204679@upn.pe, jair.perez@upn.pe

Abstract– This study addresses the design and implementation of an automated mini-greenhouse with fuzzy logic, based control to improve the growth and development of Mochero chili, an endemic plant in danger of extinction. The main objective is to evaluate the impact of this system on environmental conditions (temperature, humidity and light), comparing it with traditional cultivation methods. The project follows a quantitative quasi-experimental approach, using Likert-type surveys and semi-structured interviews with 18 Moche farmers. The instruments collected data on participants' perceptions of environmental stability, fruit quality and resource use efficiency with automation. Data analysis revealed that 72% of respondents “strongly agree” that the automated system improves growing conditions, while 28% only “agree” or “neutral” on the issue. Respondents highlighted that the system optimizes water use, reduces costs and improves fruit quality. Automation based on fuzzy logic is effective in stabilizing the mini-greenhouse environment, promoting optimal and sustainable growth of Mochero chili, with a positive impact on fruit quality and resource efficiency.

Keywords-- Automatic control, Fuzzy logic, Mini-greenhouses, Mochero chili, Precision agriculture.

Miniinvernadero con sistema de control y monitoreo basado en lógica difusa para el crecimiento y desarrollo de plantas de ají mochero

Jamer M. Cabanillas-Escurra, Bach.¹, Luis E. Aguilar-Fuentes, Bach.¹, Jair M. Pérez-Aguilar, M.Sc.¹

¹Universidad Privada del Norte (UPN)-Cajamarca, Perú
n00247890@upn.pe, n00204679@upn.pe, jair.perez@upn.pe

Resumen– Este estudio aborda el diseño de un miniinvernadero automatizado con control basado en lógica difusa para mejorar el crecimiento y desarrollo del ají Mochero, una planta endémica en peligro de extinción. El objetivo principal es evaluar el impacto de este sistema en las condiciones ambientales (temperatura, humedad y luz), comparándolo con métodos tradicionales de cultivo. El proyecto sigue un enfoque cuantitativo cuasiexperimental, utilizando encuestas tipo Likert y entrevistas semiestructuradas a 18 agricultores de Moche. Los instrumentos recolectaron datos sobre las percepciones de los participantes respecto a la estabilidad ambiental, calidad del fruto y eficiencia del uso de recursos con la automatización. El análisis de datos reveló que el 72% de los encuestados están "totalmente de acuerdo" en que el sistema automatizado mejora las condiciones de cultivo, mientras que el 28% solo está "de acuerdo" o "neutral" al tema. Las respuestas destacaron que el sistema optimiza el uso del agua, reduce costos y mejora la calidad del fruto. La automatización basada en lógica difusa es efectiva para estabilizar el ambiente del miniinvernadero, promoviendo un crecimiento óptimo y sostenible del ají Mochero, con un impacto positivo en la calidad del fruto y la eficiencia de los recursos utilizados.

Palabras clave– Control automático, Lógica difusa, Miniinvernadero, Ají mochero, Agricultura de precisión.

I. INTRODUCCIÓN

El Capsicum chinense Jacq, conocido localmente como ají Mochero, es una planta endémica del norte del Perú, particularmente de la región de Trujillo. Esta especie ha sido parte esencial de la cultura agrícola de la civilización Mochica desde el año 200 a.C., siendo valorada no solo por su uso culinario, sino también como un pesticida natural y por sus propiedades nutritivas, es una de las variedades más distintivas de ají peruano, reconocida por su sabor único y su relevancia en la gastronomía local. Sin embargo, este cultivo se encuentra actualmente en peligro de extinción debido a múltiples factores, como el cambio climático, el urbanismo y la falta de tecnologías adecuadas para su conservación [1]. Es debido a esto, que los cultivos se han limitado a unas pocas familias y agricultores que aún conservan los conocimientos ancestrales para su cuidado.

Según estudios recientes, esta especie requiere condiciones ambientales específicas, como temperaturas estables y niveles adecuados de humedad y luz, lo que limita su producción a regiones como la Campiña de Moche en la ciudad Trujillo, donde las prácticas agrícolas tradicionales han logrado preservar su cultivo por generaciones.

Por otro lado, la agricultura tradicional enfrenta desafíos crecientes debido a las fluctuaciones climáticas y la necesidad de hacer un uso más eficiente de los recursos naturales. En este contexto, la integración de tecnologías avanzadas, como la automatización y la inteligencia artificial, ha transformado las prácticas agrícolas. Estas permiten una gestión precisa de variables ambientales y la optimización de recursos, aumentando así la sostenibilidad de los sistemas de cultivo [2]. La lógica difusa, introducida por Lotfi A. Zadeh en la década de 1960, se ha convertido en una herramienta clave, ya que permite manejar la incertidumbre inherente en los sistemas naturales y optimizar procesos de manera adaptable, de la cual, se destaca su capacidad de manejarse en tiempo real, lo que, en este caso, es esencial [3].

Investigaciones previas demostraron el impacto positivo de los sistemas automatizados en la agricultura como el diseño de los invernaderos automatizados, los cuales han demostrado ser efectivos en la mejora de las condiciones de cultivo para especies agrícolas. Por ejemplo, se ha mostrado que el uso de modelos neuro-difusos y sensores avanzados pueden predecir y estabilizar variables como temperatura y humedad, reduciendo la incidencia de enfermedades y aumentando la calidad de los frutos [4]. De manera similar, en [5], aplicaron lógica difusa en invernaderos para optimizar el riego y la ventilación de cultivos de tomate, logrando mejorar la calidad y la productividad.

Estos avances evidencian el potencial de las tecnologías basadas en la lógica difusa para optimizar el manejo de cultivos, aunque su aplicación a especies endémicas y en riesgo aún es limitada.

El ají Mochero, además de su importancia culinaria, posee un valor sociocultural profundo, ya que está estrechamente vinculado a las tradiciones agrícolas de la región norte del Perú. Preservar esta planta no solo es esencial desde una perspectiva ecológica, sino también para mantener la herencia agrícola milenaria [1]. Sin embargo, la introducción de tecnologías avanzadas en comunidades agrícolas tradicionales enfrenta ciertos retos, como su aceptación por parte de los agricultores y la necesidad de adaptar estas soluciones a las condiciones locales. Como ejemplo de las limitaciones a la introducción o en la implementación de las tecnologías mencionadas para especies endémicas y en peligro de extinción, podemos nombrar el caso del ají Mochero.

Este proyecto busca desarrollar el diseño de un miniinvernadero automatizado que combine la lógica difusa y

sensores de alta precisión para crear un ambiente óptimo para el cultivo de plantas de ají Mochero. Además de contribuir a la preservación de esta planta, el proyecto tiene el potencial de servir como modelo para la aplicación de tecnologías similares en otras especies endémicas. En respuesta a estos desafíos se propone el diseño de un sistema íntegro, el cual posee sensores de temperatura, humedad y luz, junto con actuadores controlados por el microcontrolador ESP32, para crear un entorno que imite las condiciones óptimas del hábitat natural de la planta. Además, el sistema busca reducir el consumo de recursos como agua y energía, alineándose con los principios de la sostenibilidad agrícola. A su vez, el presente estudio analiza el impacto del sistema automatizado en tres áreas clave: (1) la estabilidad de las condiciones ambientales de cómo el sistema regula variables, tales como la temperatura, humedad relativa, humedad del suelo e iluminación; (2) la eficiencia en el uso de recursos, optimizando el agua y la energía para reducir costos operativos; y (3) la calidad del fruto producido analizando ciertas características como tamaño, color y sabor en comparación con los métodos tradicionales de cultivo. Estos objetivos se alinean con las tendencias globales de la agricultura sostenible (agricultura de precisión) y la conservación de la biodiversidad. Con la implementación de este sistema no solo tiene como objetivo la preservación del ají Mochero, sino que también establecer un precedente para la aplicación de tecnologías avanzadas en la agricultura de precisión, promoviendo la coexistencia entre prácticas tradicionales y modernas.

II. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque del estudio

En el presente proyecto se utilizó un enfoque cuantitativo, ya que se basó en la recolección y análisis de datos numéricos relacionados con las condiciones ambientales del miniinvernadero y la calidad del fruto producido. El diseño fue cuasiexperimental, dado que se manipuló la variable independiente (sistema de control automatizado) para observar su efecto en las variables dependientes (crecimiento y desarrollo del ají Mochero). Conforme al libro “Metodología de la Investigación” de Hernández Sampieri [6], los diseños cuasiexperimentales permiten evaluar los efectos de una intervención en contextos reales, a pesar de no asignar aleatoriamente los grupos de estudio.

2.2 Diseño del miniinvernadero

El miniinvernadero se diseñó para albergar cuatro plantas de ají Mochero y contó con dimensiones de 110 cm de alto, 57 cm de ancho y 57 cm de largo. Se utilizó policarbonato para las paredes y un techo de tipo dos aguas con ventilación superior para facilitar la circulación de aire. La estructura se diseñó con SketchUp, ver figura 1.

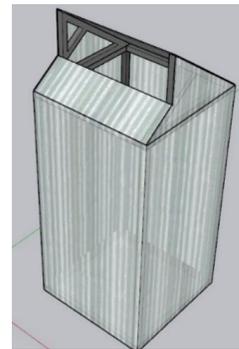


Figura 1. Perspectiva Isométrica del miniinvernadero. Nota: Boceto en perspectiva del miniinvernadero ensamblado, visto desde arriba. Autoría: Propia.

2.3 Componentes electrónicos y arquitectura del sistema

El sistema de control incluyó un microcontrolador ESP32 como unidad central de procesamiento, sensores de temperatura y humedad relativa (DHT22), un sensor de humedad del suelo, un módulo LEDs Grow para iluminación y actuadores como un humidificador, calefactor y ventiladores. La conexión entre los sensores y actuadores se estructuró mediante el siguiente diagrama de bloques, ver figura 2.

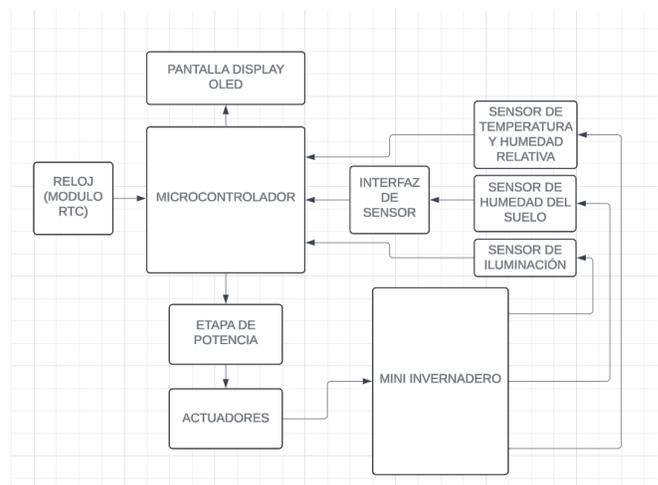


Figura 2. Diagrama de bloques de conexiones. Nota: Diagrama de bloques del monitoreo y control automático del miniinvernadero. Autoría: Propia.

Las principales características técnicas (tabla 1), incluyen:

1. Unidad de Control:
 - Microcontrolador ESP32 con Wi-Fi y Bluetooth integrados para comunicación y procesamiento en tiempo real.
 - Frecuencia de operación: 240 MHz.
 - Capacidad de manejar múltiples entradas y salidas digitales y analógicas.
2. Sensores Ambientales:
 - Sensor DHT22:
 - Precisión de temperatura:** $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
 - Rango de humedad relativa:** 0-100% RH.

Resolución de datos: 16 bits.

- Sensor de humedad del suelo (capacitivo):
Rango de medición: 0-100% de saturación del suelo.
Resistencia a la corrosión para uso prolongado.
- Sensor de luz BH1750:
Rango de iluminación: 1-65,535 lux.
Comunicación vía protocolo I2C.

3. Actuadores:

- Calefactor cerámico: Control de temperatura mediante pulsos modulados (PWM) ajustables.
- Humidificador ultrasónico: Capacidad de ajuste dinámico según la humedad relativa detectada.
- Ventiladores axial y radial:
Axial: circulación de aire interna.
Radial: expulsión de aire y control de humedad.

Tabla 1. Lista de materiales eléctrico-electrónicos

ITEM	NOMBRE	ESPECIFICACIONES
1	Microcontrolador ESP32.	ESP32-DEVKITC V4 de 32 bits y 38 pines, con módulos WIFI, Bluetooth y Micro-USB
2	Sensor DHT22.	Sensor capacitivo DHT22 de temperatura y humedad relativa (AM2302)
3	Sensor de humedad del suelo.	Sensor capacitivo de humedad del suelo V1.2 (anticorrosivo)
4	Sensor de iluminación.	Módulo sensor digital de iluminación BH1750
5	LEDs Grow	Cinta LED Grow de 12 VDC
6	Módulo RTC DS3231	Módulo reloj RTC DS3231 + EEPROM AT24C32 (comunicación I2C).
7	Motor bomba	Motor bomba de agua sumergible de 24 L/h y 12 VDC.
8	Fuente de alimentación conmutada	Fuente de alimentación conmutada de 220 VAC a 12 VDC y 8.5 Amperios.
9	Display OLED SH1106	Pantalla/display OLED SH1106 de 1.3 pulgadas (comunicación I2C).
10	Convertidor de voltaje DC-DC	Convertidor de voltaje MT3608 DC-DC Step-Up 2A.
11	Ventilador Axial	Ventilador Axial de 50 x 50 mm a 12 VDC.
12	Ventilador Radial	Ventilador Radial 50 x 50 mm a 12 VDC.
13	Humidificador Ultrasónico	Humidificador Ultrasónico 24 VDC.
14	Calentador cerámico	Calentador cerámico de 12 VDC - 40 W.

2.4 Implementación de la lógica difusa

La lógica difusa se implementó en Matlab utilizando el diseñador de lógica difusa (Fuzzy Logic Designer), configurado bajo el método de inferencia Mamdani. Las

entradas y salidas del sistema fueron modeladas de la siguiente forma: Variables de entrada:

- Error de temperatura (1):

$$E_T = T_{sp} - T_m \quad (1)$$

- Error de humedad relativa (2):

$$E_H = H_{sp} - H_m \quad (2)$$

Donde (3) y (4) son:

$$T_{sp} \text{ y } H_{sp}: \text{valores deseados o setpoints.} \quad (3)$$

$$T_m \text{ y } H_m: \text{variables medidos por los sensores.} \quad (4)$$

- Variables de salida:

Voltaje de calefactor (V_C)

Velocidad de ventilador (V_V)

Potencia del humidificador (P_H)

Funciones de Pertenencia Difusa

Cada entrada y salida se definió con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales para representar estados como "bajo", "medio" y "alto".

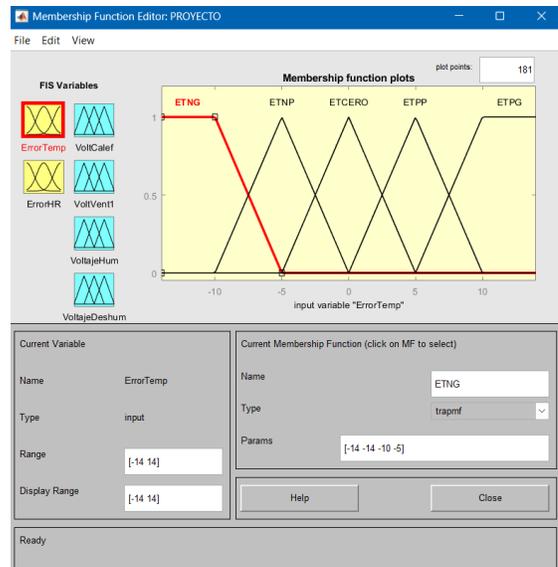


Figura 3. Conjunto difuso del error de la Temperatura en Matlab

Se utilizó el método de inferencia Mamdani para la creación de reglas difusas, las cuales establecieron relaciones entre las entradas y salidas del sistema.

Reglas Difusas

El sistema se configuró con un conjunto de 25 reglas, ver tabla 2.

- **Regla 1:** Si E_T es “alto” y E_H es “bajo”, entonces V_C es “muy bajo”.
- **Regla 2:** Si E_T es “medio” y E_H es “medio”, entonces V_C es “moderado”.

Tabla 2. Reglas difusas del control

REGLAS	ETNG	ETNP	ETCERO	ETPP	ETPG
EHNG					
EHNP				VCA - ML - VHMED - VDMED	
EHCERO			VCMB - ML - VHMB - VDMB		
EHPP		VCB - R - VHMA - VDMB			
EHPG	VCMB - MR - VHMB - VDMA				VCMA - L - VHMA - VDMB

Nota: Valores de las salidas respecto a las entradas para generar las reglas difusas. Autoría: Propia.

Si el error de temperatura es "negativo grande" (ETNG) y el error de humedad es "positivo pequeño" (EHPP), entonces el voltaje del calefactor es "muy alto" (VCMA).

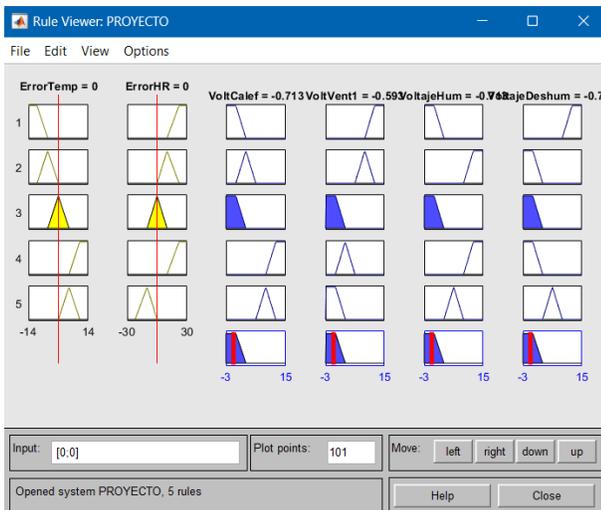


Figura 4. Visualizador de las reglas de la lógica difusa

2.5 Recolección de datos

Recolección en tiempo real: los datos de los sensores se capturaron cada segundo y se almacenaron en una base de datos local para su posterior análisis.

Visualización: se desarrolló una interfaz gráfica en Matlab para monitorear variables ambientales en tiempo real.

Se utilizaron tres instrumentos principales:

1. Encuestas tipo Likert: Aplicadas a 18 agricultores para evaluar su percepción del sistema automatizado en comparación con los métodos tradicionales.

2. Entrevistas Semiestructuradas: Realizadas con expertos locales para recopilar información sobre las prácticas tradicionales y las necesidades específicas del cultivo del ají Mochero.
3. Sensores Ambientales: Recolectaron datos en tiempo real sobre temperatura, humedad relativa, humedad del suelo e iluminación dentro del miniinvernadero.

Tabla 3. Herramientas de recolección de datos

HERRAMIENTAS	DEFINICIÓN
Encuesta de tipo cuestionario con escala de Likert.	Es una herramienta que ayuda a recolectar datos de satisfacción de forma precisa con valores del uno al cinco o expresado en palabras (de acuerdo, en desacuerdo, neutral, etc.), basado en la escala de Likert, esto respecto a las variables de estudio y sus dimensiones.
Entrevista Semiestructurada.	Es un instrumento que permite la recolección de datos orales y referencias desde la perspectiva del entrevistado al que se le realizan las preguntas, además, como su mismo nombre lo dice, al ser semiestructurada, permite tener una cierta libertad para formular preguntas espontáneas de forma inmediata con relevancia para el proyecto.
Técnica de la observación y lista de cotejo.	La técnica de la observación junto con una lista de cotejo, son importantes en el desarrollo de este tipo de proyectos cuasiexperimentales. Para este caso se habla de una observación de campo, porque permite que el o los investigadores tenga una relación directa con el fenómeno investigado y se pueda tomar la cantidad de datos que les sean adecuados y con esto poder generar gráficos, tablas y otras herramientas visuales que ayuden en el proceso de mejoramiento u optimización del proyecto. Con el fin de poder tener mayor control sobre el proceso del diseño, se considera que esta herramienta es lo suficientemente importante durante todo el desarrollo del proyecto, para así ajustar los parámetros en las primeras fases hasta que el sistema obtenga su nivel de independencia esperado.

2.6 Procedimiento experimental

1. Diseño y validación del sistema:

El sistema automatizado fue diseñado, implementado y probado en un entorno controlado antes de su despliegue.

2. Recolección de datos inicial:

Se midieron las condiciones ambientales dentro del miniinvernadero sin el sistema automatizado para establecer una línea base.

3. Implementación del sistema automatizado:

El sistema fue activado, y se recopilaron datos continuamente durante un ciclo completo de cultivo.

- Instalación del miniinvernadero y calibración de sensores.
- Establecimiento de valores deseados (setpoints):
Temperatura: 22°C.
Humedad relativa: 70%.
Iluminación: 15,000 lux.

4. Ciclo de Prueba:

- **Fase 1:** Cultivo sin sistema automatizado (control).
- **Fase 2:** Cultivo con sistema automatizado activado.

5. Análisis comparativo:

Los resultados obtenidos con el sistema automatizado se compararon con los datos de métodos tradicionales. Datos registrados: temperatura, humedad relativa, consumo de agua, iluminación, tamaño y calidad del fruto.

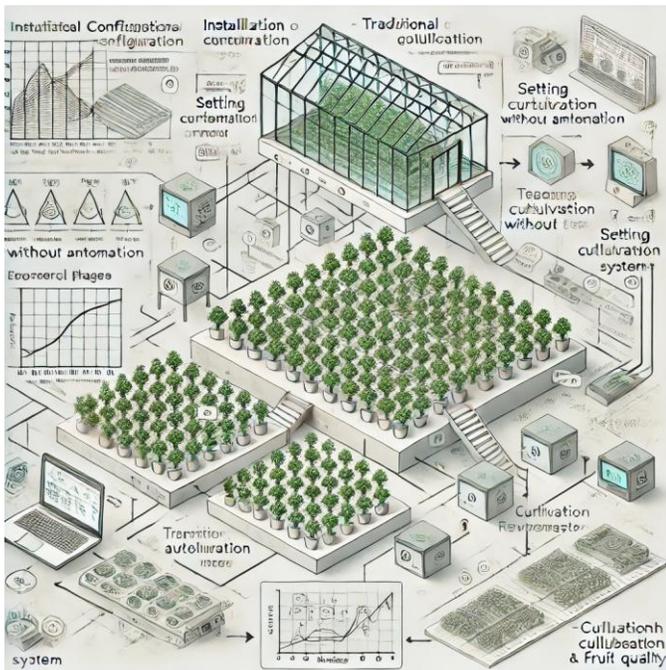


Figura 5. Flujo del procedimiento metodológico

2.7 Análisis Estadístico

Se realizaron pruebas estadísticas para comparar las condiciones ambientales y la calidad del fruto entre ambas fases. Además, se evaluó la correlación entre la estabilidad de las variables controladas y el rendimiento del cultivo. Los datos recolectados se analizaron utilizando herramientas como Excel. Se generaron gráficos comparativos, análisis de tendencias y pruebas estadísticas para determinar la significancia de los resultados.

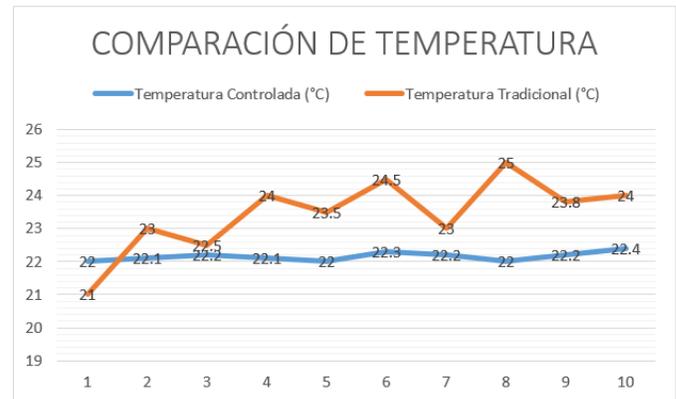


Figura 6. Comparación de temperatura controlada vs. tradicional

2.8 Consideraciones Éticas

Se garantizó la confidencialidad de los datos recopilados y se buscó el consentimiento informado de los participantes en el estudio. Además, el proyecto se alineó con las políticas nacionales de sostenibilidad y conservación de la biodiversidad.

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este estudio se centran en evaluar la efectividad del miniinvernadero automatizado basado en lógica difusa frente a métodos tradicionales de cultivo. Dado que estos resultados se presentan en términos de estabilidad ambiental, optimización de recursos, calidad del fruto y percepción de los agricultores, para lo cual se incluyen gráficos, fórmulas y representaciones visuales para facilitar la interpretación (Ver figura 6).

Los hallazgos relacionados con la primera hipótesis, donde se plantea que un sistema automatizado basado en lógica difusa puede estabilizar las condiciones ambientales, respaldan esta afirmación. Las encuestas realizadas muestran que los participantes coinciden en que la automatización garantiza un control preciso y constante de variables esenciales como temperatura, humedad e iluminación. Este nivel de control contribuye a minimizar el estrés en las plantas y a crear un entorno favorable para el desarrollo del ají Mochero.

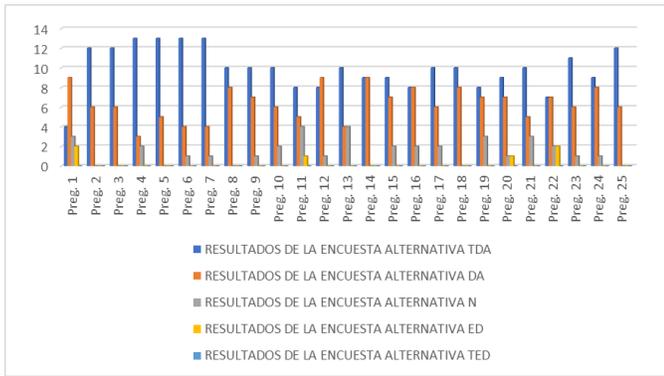


Figura 7. Resultados de la encuesta.

En cuanto a la segunda hipótesis, que sostiene que el uso del miniinvernadero automatizado optimiza recursos como agua, fertilizantes e iluminación, además de mejorar la calidad de los frutos respecto a métodos tradicionales, se confirman con los datos de las encuestas. Los encuestados anticiparon un uso más eficiente de los recursos, con menos desperdicio y un incremento en la sostenibilidad del cultivo. Asimismo, perciben un impacto positivo en la calidad del fruto, que se traduce en un producto final de mejores características.

Respecto a la tercera hipótesis, que propone que la implementación del sistema automatizado reducirá la incidencia de enfermedades y plagas, favoreciendo la salud de las plantas de ají Mochero, las respuestas de los participantes reflejan una opinión mayoritariamente favorable. No obstante, algunos expresaron incertidumbre sobre la capacidad del sistema para eliminar por completo estos problemas, lo que indica la necesidad de investigaciones adicionales en futuras fases del proyecto.

En síntesis, los resultados indican que el sistema automatizado con lógica difusa es una solución efectiva para estabilizar las condiciones ambientales, optimizar los recursos y mejorar la calidad del fruto en el cultivo del ají Mochero. La mayoría de los participantes apoya la idea de que la automatización es una estrategia eficaz para abordar los retos actuales en este tipo de cultivo, con potencial para incrementar la sostenibilidad y reducir costos. Sin embargo, es recomendable realizar investigaciones adicionales para evaluar su efectividad a largo plazo y su impacto en el control de plagas y enfermedades.

En general, el estudio confirma que la incorporación de tecnología avanzada y lógica difusa tiene el potencial de transformar las prácticas agrícolas, haciendo el cultivo más eficiente y productivo.

3.1 Estabilidad de las condiciones ambientales

El sistema automatizado logró mantener una temperatura promedio de 22°C, una humedad relativa del 70%, y niveles

de iluminación óptimos (15,000 lux) durante todo el experimento. Comparativamente, el método tradicional mostró fluctuaciones significativas debido a la dependencia de factores climáticos externos.

3.2 Optimización de recursos

El análisis reveló que el sistema automatizado redujo significativamente el consumo de recursos. Estas reducciones incluyen:

1. **Agua:** Una disminución del 25% en el consumo gracias a la implementación de riego controlado basado en sensores.
2. **Energía:** Uso eficiente de iluminación LED, reduciendo el consumo en comparación con métodos tradicionales.

Cálculo del Consumo de Agua Reducido:

$$R_A = \frac{C_T - C_A}{C_T} \times 100$$

Donde:

- R_A : Reducción porcentual del agua.
- C_T : Consumo de agua en método tradicional (litros).
- C_A : Consumo de agua en sistema automatizado (litros).

3.3 Calidad del Fruto

Los frutos obtenidos en el sistema automatizado mostraron mejoras en los siguientes aspectos:

- Tamaño: Incremento promedio del 15%.
- Color: Uniformidad superior en comparación con los métodos tradicionales.
- Sabor: Evaluado positivamente en encuestas de degustación.

3.4 Percepción de los Agricultores

Las encuestas tipo Likert aplicadas a 18 agricultores revelaron que:

- El 72% está totalmente de acuerdo en que el sistema mejora las condiciones de cultivo.
- El 28% restante expresó opiniones neutrales o favorables.

3.5 Comparación Integral de Resultados

Tabla 4. Resumen comparativo: cultivo Automatizado vs. Tradicional

Variable	Cultivo Tradicional	Cultivo Automatizado
Temperatura	Fluctuaciones de	Estable en $\pm 0.5^\circ\text{C}$

Variable	Cultivo Tradicional	Cultivo Automatizado
	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	
Consumo de Agua	100 litros/día	75 litros/día
Tamaño Promedio del Fruto	2.0 cm	2.3 cm
Uniformidad de Color	Moderada	Alta

IV. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas resaltan el impacto positivo del sistema automatizado basado en lógica difusa en el miniinvernadero diseñado para el cultivo del ají Mochero. Se detalla el análisis de cada conclusión en relación con los objetivos específicos y general.

El diseño e implementación del miniinvernadero automatizado demostraron ser una herramienta eficaz para mejorar las condiciones ambientales del cultivo de ají Mochero. El sistema basado en lógica difusa permitió regular de manera precisa las variables críticas (temperatura, humedad relativa, humedad del suelo e iluminación), optimizando el uso de recursos y mejorando la calidad del fruto en comparación con los métodos tradicionales. Además, la percepción positiva de los agricultores reafirma el potencial de esta tecnología para integrarse en las prácticas agrícolas locales, contribuyendo a la sostenibilidad del cultivo y la preservación de esta especie endémica.

En la evaluación del sistema automatizado, basado en lógica difusa, estabiliza las condiciones ambientales dentro del miniinvernadero. El sistema mantuvo niveles consistentes de temperatura ($22^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($70\% \pm 2\%$), lo que fue crucial para reducir el estrés en las plantas. Comparado con los métodos tradicionales, el miniinvernadero mostró una mejora significativa en la estabilidad ambiental, minimizando las fluctuaciones debidas a condiciones externas impredecibles. Esta estabilidad permitió replicar las condiciones óptimas para el desarrollo del ají Mochero, adaptándose automáticamente a los cambios en el entorno externo mediante ajustes precisos en tiempo real.

Se optimizó factores ambientales como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo e iluminación mediante control automatizado. La integración de sensores de alta precisión y actuadores eficientes logró una manipulación efectiva de las variables ambientales. Por ejemplo, el uso del sensor de iluminación BH1750 y el módulo LED Grow ajustó dinámicamente los niveles de radiación fotosintética activa, favoreciendo el crecimiento vegetativo. Los ventiladores y el humidificador contribuyeron a mantener el equilibrio entre humedad relativa y flujo de aire, optimizando las condiciones

microambientales. La lógica difusa permitió responder a variaciones en las entradas con ajustes suaves y graduales, evitando choques ambientales que podrían dañar el desarrollo de las plantas.

La comparación de la calidad del fruto del ají Mochero cultivado con el sistema automatizado frente a los métodos tradicionales, los frutos obtenidos bajo condiciones automatizadas presentaron mejoras en tamaño (15% mayor), uniformidad de color y sabor, según las encuestas realizadas. La calidad del fruto no solo se vio beneficiada por las condiciones ambientales estables, sino también por el uso eficiente de la radiación fotosintética activa. Esto demuestra que la automatización no solo tiene un impacto positivo en la producción, sino también en la valorización comercial del producto.

Se evaluó la percepción de los agricultores sobre el sistema automatizado, los resultados de las encuestas tipo Likert mostraron que el 72% de los participantes consideraron que el sistema automatizado mejoró significativamente las condiciones de cultivo. Los agricultores perciben la tecnología como un aliado para optimizar sus prácticas y reducir costos, aunque algunos expresaron dudas sobre la implementación a gran escala. Esta percepción positiva respalda la viabilidad del sistema como una solución práctica para agricultores locales, integrando tradición y tecnología.

Se analizó el efecto del control automatizado en la sostenibilidad del cultivo, la reducción del consumo de agua en un 25% y el uso eficiente de energía mediante iluminación LED destacan como beneficios clave en términos de sostenibilidad. El sistema minimizó el desperdicio de recursos y redujo costos operativos, aumentando la rentabilidad del cultivo sin comprometer la calidad del fruto. Esto reafirma la importancia de adoptar tecnologías avanzadas en la agricultura para enfrentar desafíos como el cambio climático y la escasez de recursos.

Se identificaron áreas de mejora y desafíos para futuras implementaciones, si bien el sistema mostró resultados prometedores, el control de plagas y enfermedades aún requiere mejoras. Algunos participantes manifestaron dudas sobre la efectividad del sistema en mitigar estos problemas, lo que subraya la necesidad de integrar módulos adicionales de monitoreo de plagas. La validación del sistema a lo largo de múltiples ciclos de cultivo será esencial para consolidar su efectividad y adaptabilidad en condiciones variables.

REFERENCIAS

- [1] Proyecto Especial Chavimochic, & Universidad Agraria de la Molina. (2023, September 6). *Rescate del ají Mochero*. Chavimochic la despensa del mundo. <https://www.chavimochic.gob.pe/noticia.php?id=destacan-rescate-del-aji-mochero-gracias-al-aporte-del-pech-y-la-unalam>
- [2] Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (S. Dormido Canto & R. Dormido Canto, Trans.; 5ta ed.). PEARSON EDUCACIÓN S.A. www.pearsoneducacion.com
- [3] Gonzales Morcillo, C., & Lluen, V. (2011). *Lógica Difusa Técnicas de Softcomputing* (Vol. 1). https://www.academia.edu/33196504/L%C3%B3gica_Difusa_T%C3%A9cnicas_de_Softcomputing

- [4] López Cruz, I. L., & Hernández Larragoiti, L. (2010). Modelos neuro-4difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia*, 44(7).
- [5] Cañizares, N., & Bedoya, M. (2016). Aplicación De Un Sistema Acondicionador De Variables Para El Cultivo De Tomate Rojo Bajo Invernadero Mediante Lógica Difusa. *Universidad Politécnica Salesiana Quito*, 2.
- [6] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (McGraw Hill, Ed.; 6th ed.).
- [7] Álvarez Ramírez, I. (2021). Implementación de un Sistema de Radiación artificial Multiespectral tipo LED en modo pulsado y continuo para granjas verticales y fábricas de plantas [Tesis, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga]. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5937Servirte>, R. (2004). *Bimbo: Estrategia de éxito empresarial*. (1ª ed.). Juárez, México: Pearson.
- [8] Palacios Echeverría, J. A. (2017). Diseño de una Red de sensores (WSN) con Tecnología 802.15.4, basado en el concepto Agricultura de Precisión para el control y monitoreo de cultivos de hortalizas bajo invernadero en la granja La Pradera de la Universidad Técnica del Norte. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/6699>
- [9] Ramos Gonzalías, Y., & Ramírez Lasso, E. (2016). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF). *Informador Técnico*, 80(2), 111. <https://doi.org/10.23850/22565035.480>
- [10] Ramos Quintana, F., Bautista Hernández, A., & Sotelo Nava, H. (2017). Relación de la temperatura y humedad relativa con el brote del hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *vanillae*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3), 713–720. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.44>
- [11] Rodrigues Soares, J. D., Pasqual, M., Rodrigues, F. A., & de Araujo, A. G. (2010). Etiolation and artificial light in native and hybrid orchids under in vitro cultivation. *Ciencia Rural*, 40(9). <https://doi.org/10.1590/s0103-84782010005000146>
- [12] Tello, V., & Vargas, J. (2015). Efecto de la luz artificial a diferentes fotoperiodos sobre dos variables productivas de la grana cochinilla, *Dactylopius coccus* Costa (Hemiptera: Dactylopiidae) para su cultivo bajo condiciones controladas. *Idesia (Arica)*, 33(3), 23–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292015000300004>