

Microclima automatizado para el cultivo de seta *Pleurotus djamor*

Automated microclimate for the cultivation of *Pleurotus djamor* mushrooms

Mauricio Aarón **Pérez Romero**¹
Oswaldo **De los Santos Hernández**²
Jair de Jesús **Nava Cisneros**³
Armando Josué **Piña Díaz**⁴

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0005-5639-770X / maperezro@ipn.mx

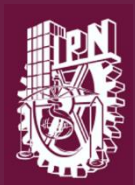
² ORCID: 0009-0008-5695-3421 / odelossantosh1700@alumno.ipn.mx

³ ORCID: 0009-0005-6249-7272 / jnavac1700@alumno.ipn.mx

⁴ ORCID: 0000-0002-2723-6369 / apinad@ipn.mx

<https://cientifica.site>

Recibido 19/12/2025, aceptado 20/01/2026, publicado 30-01-2026.



Resumen

El cultivo de setas comestibles del género *Pleurotus* requiere condiciones ambientales estrictas para un desarrollo micelial adecuado y una fructificación eficiente. En particular, *Pleurotus djamor* presenta alta sensibilidad a variaciones de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono e iluminación, lo que limita su producción bajo métodos artesanales. En este trabajo se presenta el diseño, implementación y evaluación experimental de un sistema automatizado para el control de microclima aplicado al cultivo de *Pleurotus djamor*. El sistema propuesto integra un microcontrolador ESP32-S3, sensores ambientales para la medición de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, así como actuadores para el control de riego por nebulización, ventilación, calefacción e iluminación LED específica. Se implementó una estrategia de control jerárquico con modos de operación diferenciados para las etapas de incubación y fructificación, con monitoreo remoto mediante interfaces móviles y mensajería instantánea. Los resultados experimentales demostraron que el sistema automatizado mantuvo las variables ambientales dentro de los rangos óptimos establecidos para cada etapa del cultivo, con desviaciones inferiores al $\pm 1\%$ respecto al valor de referencia. En comparación con un testigo artesanal, el sistema automatizado incrementó la producción total de cuerpos fructíferos de 0.451 kg a 2.49 kg y elevó la eficiencia biológica del 15.03 % al 83 %. Asimismo, se observó una mejora significativa en la calidad sensorial de las setas obtenidas. Los resultados confirman que el control automático del microclima constituye una alternativa eficiente, reproducible y de bajo costo para optimizar el cultivo de *Pleurotus djamor*, con aplicaciones potenciales en sistemas productivos a pequeña y mediana escala.

Palabras clave: cultivo de setas, IoT agrícola, eficiencia biológica.

2

Abstract

The cultivation of edible mushrooms of the genus *Pleurotus* requires strict environmental conditions to ensure proper mycelial development and efficient fructification. In particular, *Pleurotus djamor* exhibits high sensitivity to variations in temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration, and lighting, which limits its production under artisanal cultivation methods. This work presents the design, implementation, and experimental evaluation of an automated microclimate control system applied to the cultivation of *Pleurotus djamor*. The proposed system integrates an ESP32-S3 microcontroller, environmental sensors for measuring temperature, relative humidity, and CO₂ concentration, as well as actuators for controlling mist irrigation, ventilation, heating, and specific LED lighting. A hierarchical control strategy with differentiated operating modes for the incubation and fructification stages was implemented, along with remote monitoring through mobile interfaces and instant messaging services. Experimental results demonstrated that the automated system maintained the environmental variables within the optimal ranges established for each cultivation stage, with deviations below $\pm 1\%$ with respect to the reference values. Compared to an artisanal control system, the automated system increased the total production of fruiting bodies from 0.451 kg to 2.49 kg and raised the biological efficiency from 15.03% to 83%. In addition, a significant improvement in the sensory quality of the harvested mushrooms was observed. These results confirm that automatic microclimate control represents an efficient, reproducible, and low-cost alternative for optimizing the cultivation of *Pleurotus djamor*, with potential applications in small and medium scale production systems.

Index terms: mushroom cultivation, agricultural IoT, biological efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de hongos comestibles ha adquirido una relevancia creciente dentro de los sistemas agroalimentarios debido a su alto valor nutricional, su capacidad para aprovechar residuos agroindustriales como sustrato y su potencial para desarrollarse en espacios reducidos. Estas características han posicionado a los hongos como una alternativa sostenible para la producción de alimentos con bajo impacto ambiental y alto valor agregado [1]. Entre las especies más estudiadas se encuentra el género *Pleurotus*, el cual presenta ciclos de crecimiento cortos, elevada eficiencia biológica y una amplia adaptabilidad a distintos sustratos lignocelulósicos. No obstante, el cultivo de *Pleurotus djamor*, conocida como seta rosa, se distingue por su alta sensibilidad a las condiciones ambientales, lo que convierte al control del microclima en un factor determinante para su productividad y calidad comercial [2].

Diversos estudios han documentado que variables ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono y la iluminación influyen directamente en las etapas de incubación y fructificación de las setas [3]. Estas variables regulan procesos fisiológicos fundamentales, como la actividad metabólica del micelio y el balance hídrico de los cuerpos fructíferos. Cuando las condiciones ambientales se alejan de los rangos adecuados, se presentan retrasos en la colonización del sustrato, alteraciones morfológicas y reducciones en el rendimiento del cultivo [4].

En los sistemas de producción tradicionales o artesanales, el ajuste de la temperatura y la humedad relativa suele realizarse de forma manual y depende en gran medida de las condiciones climáticas externas y de la experiencia del productor, lo que introduce incertidumbre y limita la trazabilidad del proceso [5]. Este enfoque introduce incertidumbre operativa, limita la repetibilidad del proceso y dificulta la trazabilidad de las condiciones de cultivo, lo que se traduce en variaciones significativas en la calidad y cantidad de la producción obtenida. Ante estas limitaciones, la automatización del control ambiental ha sido ampliamente explorada como una estrategia para mejorar la estabilidad del microclima en el cultivo de hongos [6], [7].

En particular, los sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) han emergido como una alternativa viable para el monitoreo y la regulación en tiempo real de variables críticas como la temperatura y la humedad relativa. Estas plataformas permiten la integración de sensores, actuadores y sistemas de comunicación inalámbrica para la supervisión continua del proceso productivo y la toma de decisiones automatizada [8], [9]. En [10] se presentó una comparación entre un sistema de cultivo artesanal y un sistema automatizado basado en IoT, donde se reportó un incremento en el rendimiento promedio por ciclo de cultivo, atribuible a la estabilidad de las condiciones ambientales. Dichos resultados evidencian que el control consistente de la temperatura y la humedad relativa favorece un crecimiento más uniforme del micelio y una fructificación más abundante.

Otros trabajos han ampliado este enfoque mediante la incorporación de sistemas electrónicos de monitoreo y control ambiental. En [11] se desarrolló un sistema para la supervisión de parámetros como temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono en cultivos de hongos, demostrando que las plataformas autónomas basadas en sensores permiten mantener condiciones ambientales más estables durante el proceso productivo. De manera complementaria, estudios enfocados en sistemas de producción agrícola bajo invernadero han señalado que la automatización reduce los errores asociados a la intervención humana y favorece la estabilidad operativa continua, independientemente del tipo de cultivo [12].

Desde una perspectiva de accesibilidad económica y tecnológica, diversos autores han demostrado la viabilidad de implementar invernaderos inteligentes de bajo costo mediante el uso de microcontroladores, sensores comerciales y plataformas IoT para el monitoreo remoto [13]. Aunque estos trabajos no se enfocan específicamente en el cultivo de hongos, aportan evidencia relevante sobre la escalabilidad, flexibilidad y reducción de costos de las arquitecturas IoT

aplicadas al control ambiental. Sin embargo, a pesar de los avances reportados, una parte significativa de los estudios existentes se concentra principalmente en el monitoreo de variables ambientales, sin integrar estrategias de control claramente definidas ni evaluaciones experimentales comparativas a lo largo de todo el ciclo de cultivo. Asimismo, son limitados los trabajos que analizan de forma integral el impacto del control automático del microclima sobre la eficiencia biológica y la calidad sensorial del *Pleurotus djamor* frente a sistemas de producción artesanales.

En este contexto, el presente trabajo aborda el diseño e implementación de un sistema automatizado para el control del microclima aplicado al cultivo de *Pleurotus djamor*. El sistema integró sensores ambientales, actuadores eléctricos y un microcontrolador con conectividad inalámbrica, junto con una estrategia de control jerárquico diferenciada para las etapas de incubación y fructificación. El objetivo principal consistió en evaluar experimentalmente el desempeño del sistema automatizado mediante una comparación directa con un sistema de cultivo artesanal, considerando la estabilidad ambiental, la producción de cuerpos fructíferos, la eficiencia biológica y la calidad sensorial del producto obtenido.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló mediante un enfoque experimental comparativo, orientado a evaluar el desempeño de un sistema automatizado de control del microclima frente a un sistema testigo de tipo artesanal. Ambos sistemas emplearon sacos de cultivo comercialmente preparados, con el objetivo de garantizar condiciones iniciales homogéneas en términos del material biológico y del sustrato, y de esta manera aislar el efecto del sistema de control ambiental como principal variable de análisis.

4

Los sacos de cultivo utilizados fueron adquiridos de manera comercial y se entregaron previamente preparados e inoculados por el proveedor. El sustrato estuvo conformado principalmente por paja y aserrín, junto con otros compuestos orgánicos propios de la formulación comercial, cuya composición exacta no fue especificada por el fabricante. Este tipo de sustratos se emplea de forma habitual en sistemas de producción artesanal y semitecnificada de hongos comestibles, ya que proporciona una formulación balanceada y condiciones iniciales adecuadas para el desarrollo del micelio del género *Pleurotus*.

En el contexto del presente trabajo, el uso de sacos comerciales permitió reducir la variabilidad asociada a la preparación manual del sustrato y asegurar la repetibilidad del experimento al enfocar el análisis en la evaluación del impacto del control automático del microclima sobre el desempeño del cultivo. Una representación general del esquema experimental se muestra en la Figura 1.



Fig. 1. Bolsa de cultivo.

El experimento contempló dos etapas del ciclo de cultivo: incubación y fructificación. En ambas etapas se monitorearon las variables ambientales críticas de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono, consideradas determinantes para el desarrollo fisiológico del hongo. Adicionalmente, en el sistema automatizado se implementó el control del fotoperiodo durante la etapa de fructificación, de acuerdo con los requerimientos fisiológicos reportados para la especie, mientras que en el sistema testigo estas condiciones dependieron del manejo manual y de las condiciones ambientales del entorno.

El hábitat experimental consistió en una estructura portátil de tipo invernadero, fabricada con tubular plástico y cubierta de polivinilo, cuyas dimensiones fueron de 91.95 cm × 91.95 cm × 107.95 cm (véase Figura 2). En el interior del hábitat se colocaron tres bolsas de cultivo de *Pleurotus djamor*, con dimensiones estándar de 23 cm de altura, 17.5 cm de base y 13 cm de ancho (la capacidad del invernadero es de 24 bolsas). La distribución interna consideró el espacio necesario para la ubicación estratégica de los sensores ambientales y los sistemas de riego, ventilación e iluminación.

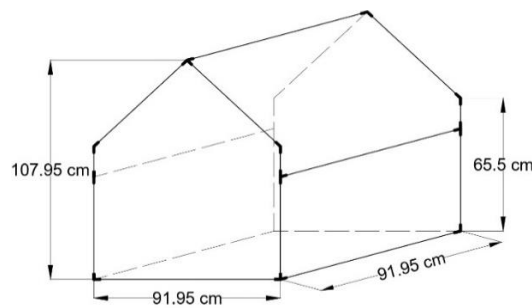


Fig. 2. Dimensiones del hábitat experimental.

El sistema automatizado se diseñó bajo una arquitectura modular con sensores, actuadores y un controlador central. Como unidad de procesamiento se utilizó un microcontrolador ESP32-S3, seleccionado por su capacidad de cómputo, conectividad Wi-Fi integrada y compatibilidad con entornos de desarrollo de código abierto. Para la medición de las variables ambientales se empleó un sensor ambiental BME680, el cual permitió registrar temperatura, humedad relativa y estimaciones de concentración de CO₂, en una arquitectura típica de sensado y control distribuido empleada en sistemas agrícolas automatizados [14]. Los actuadores del sistema incluyeron una bomba de agua para riego por nebulización, un extractor de aire para la renovación y control de CO₂, un resistor eléctrico de potencia para calefacción y luminarias LED de cultivo de espectro completo para la etapa de fructificación (véase Figura 3).



Fig. 3. Hábitat experimental.

El diagrama mostrado en la Figura 4, representa las etapas de comunicación del sistema. El microcontrolador ESP32-S3 se comunica mediante el protocolo I²C con el sensor ambiental BME680, que integra un termistor, un sensor capacitivo y uno resistivo para medir temperatura, humedad relativa y gases, para la estimación de CO₂. La librería *bsec.h* procesa internamente los datos de calidad del aire. Con esta información, el ESP32-S3 envía la señal para accionar los actuadores (bomba de agua, un extractor, una resistencia y una lámpara). Se utiliza la librería *Dimmer.h* para regular las variables de control de cada actuador. Además del control físico del entorno, el sistema cuenta con capacidad de interacción remota. Esto se logra mediante conexión Wi-Fi, gestionada por la librería *WiFiManager.h*, para la configuración de la red. Para el monitoreo y control desde una interfaz móvil o en línea, se emplean las plataformas *RemoteXY* y *Telegram*. La comunicación con estas plataformas se habilita por medio de *WiFiClientSecure.h* y *UniversalTelegramBot.h*, lo que permite al usuario recibir notificaciones, visualizar parámetros y enviar comandos al sistema desde cualquier lugar. Por último, las configuraciones personalizadas del usuario, como umbrales de activación o valores de referencia, se almacenan al utilizar la librería *Preferences.h*.

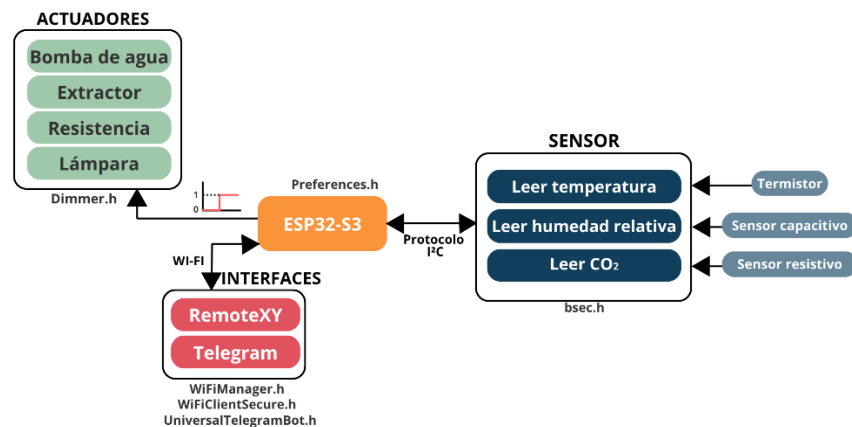


Fig. 4. Comunicación del sistema.

Para el control de la humedad relativa se seleccionó un sistema de riego por nebulización, debido a su capacidad para generar una fina nube de agua que incrementa la humedad ambiental sin dañar los cuerpos fructíferos. El sistema de riego por nebulización se alimentó con agua potable de red, utilizada de manera habitual en sistemas de cultivo artesanal de hongos. En el presente estudio no se realizó un análisis fisicoquímico de la calidad del agua, debido a que el objetivo del trabajo se centró en la evaluación del control del microclima y no en el efecto de la composición del agua sobre el crecimiento del hongo. No obstante, al emplearse un sistema de nebulización de baja presión y periodos cortos de activación, se minimizó la acumulación de sales o residuos sobre los cuerpos fructíferos y los componentes del sistema.

Cada nebulizador seleccionado presentó un caudal nominal promedio de 7 L/h. Se consideró la instalación de tres aspersores dentro del hábitat, el caudal total requerido se calculó mediante la ecuación (1):

$$Q = n \cdot q \quad (1)$$

donde Q representa el caudal total del sistema, n el número de aspersores y q el caudal nominal de cada aspersor. Para analizar el comportamiento hidráulico del sistema, el caudal volumétrico se relacionó con el área transversal de la manguera y la velocidad del flujo mediante la ecuación (2):

$$Q = A \cdot v \quad (2)$$

donde A corresponde al área de la sección transversal y v a la velocidad del fluido. Una vez conocida la velocidad del flujo, se procedió a estimar la pérdida de presión a lo largo del sistema de riego empleando la ecuación (3) de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = \frac{f \cdot \ell \cdot \rho \cdot v^2}{D \cdot 2} \quad (3)$$

donde f es el factor de fricción, ℓ la longitud total de la tubería, D el diámetro interno y ρ la densidad del agua. Para determinar el régimen de flujo y el factor de fricción correspondiente, se calculó el número de Reynolds mediante la ecuación (4):

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

Finalmente, la potencia hidráulica P_h requerida por la bomba se estimó a partir de la ecuación (5):

$$P_h = \frac{Q \cdot ((H \cdot \rho \cdot g) + \Delta P)}{1000} \quad (5)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y H la altura equivalente del sistema.

El sistema de ventilación se diseñó con el objetivo de regular la temperatura, la concentración de dióxido de carbono y el exceso de humedad relativa. Para ello, se calculó el volumen interno del hábitat a partir de sus dimensiones geométricas, modelándolo como un prisma rectangular con sección triangular superior. Una vez determinado el volumen total, se seleccionó un extractor axial con capacidad para renovar el aire del hábitat.

El control de la temperatura se realizó mediante un resistor eléctrico de potencia, el cual calentó el aire suministrado por el extractor. Durante la etapa de fructificación se implementó un sistema de iluminación LED de cultivo con espectro específico, compuesto por longitudes de onda azul (~455 nm) y roja (~610 nm). La selección se realizó al considerar que la combinación de ambos espectros favorece la formación de cuerpos fructíferos y mejora la calidad visual del producto. Las luminarias se instalaron en la parte superior del hábitat y se controlaron mediante un relevador de estado sólido con fotoperiodos de 8 horas diarias. Los actuadores del sistema fueron controlados mediante circuitos electrónicos de potencia con detección de cruce por cero y control de ángulo de disparo.

A. Filosofía de operación

La filosofía de operación del sistema se fundamentó en el ajuste automático de las variables ambientales críticas para el cultivo de *Pleurotus djamor*, específicamente la temperatura, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono y los fotoperiodos, mediante una estrategia de control basada en jerarquía y modos de operación.

Una vez energizado el sistema, el usuario realiza la configuración inicial de la red Wi-Fi. Tras completar este proceso, el sistema establece la conexión inalámbrica y queda habilitado para su operación y supervisión remota mediante las interfaces disponibles. Al configurarse por primera vez, el sistema inicia automáticamente la etapa de incubación y establece el “día cero” del ciclo de cultivo.

La etapa de incubación se estableció con una duración de 15 días, durante los cuales el sistema fijó los parámetros de operación en una temperatura de 28°C, una humedad relativa del 65% y un límite máximo de 1800 ppm para la concentración de CO₂. Durante esta etapa no se aplicaron fotoperiodos, manteniéndose el hábitat en condiciones de oscuridad controlada, conforme a los requerimientos fisiológicos de la especie.

El sensor ambiental realiza mediciones cada tres segundos. Con base en estas lecturas, el sistema evalúa de manera periódica el estado de la humedad relativa y, en caso de detectarse un valor inferior al de referencia establecido (*setpoint*), activa el sistema de riego por nebulización durante un periodo de cuatro segundos. Esta decisión se valida cada quince minutos y se ejecuta de forma independiente al funcionamiento del extractor de aire y del sistema de calefacción.

En primer lugar, el sistema verifica si la humedad relativa es mayor o igual al *setpoint* más un margen del 4%. En caso afirmativo, el extractor modula su velocidad de giro para reducir el exceso de humedad. En segundo lugar, se evalúa la temperatura; si esta supera el *setpoint* en un margen igual o superior a 3°C, el extractor incrementa su potencia para la disipación térmica. Posteriormente, se analiza la concentración de CO₂ y, si esta excede el *setpoint* en 200 ppm, el sistema aumenta la renovación de aire para disminuir la concentración del gas. Finalmente, si ninguna de las variables supera los rangos establecidos, el extractor opera a una potencia predefinida con el objetivo de introducir aire fresco al hábitat. Este ciclo de evaluación se repite de manera continua durante toda la etapa de incubación.

Al concluir la incubación, el sistema realiza de forma automática la transición a la etapa de fructificación. En esta segunda etapa, los parámetros de operación se ajustan a una temperatura de 24°C, una humedad relativa del 85% y un límite máximo de 2200 ppm de CO₂. Adicionalmente, se activa el sistema de iluminación mediante lámparas LED con longitudes de onda azul de 455 nm y roja de 610 nm, con un fotoperiodo de ocho horas diarias, programado de 00:00 a 08:00 h bajo un formato de 24 horas.

Durante ambas etapas del cultivo, el sistema mantiene un contador interno que registra el tiempo transcurrido en horas y días. Cada hora, el sistema envía una notificación automática a través de la plataforma *Telegram*, para informar al usuario el estado actual del hábitat y los valores de las variables ambientales. De manera simultánea, la interfaz gráfica *RemoteXY* se actualiza de forma continua, para mostrar las mediciones realizadas por el sensor cada tres segundos.

Durante la operación real del sistema, las variables ambientales fueron reguladas de manera continua a lo largo de las etapas de incubación y fructificación, mediante la aplicación repetitiva de la lógica de control descrita. El comportamiento real de la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂ se mantuvo dentro de bandas cercanas a los valores de referencia establecidos, como resultado de la interacción permanente entre el sistema de medición, los controladores y los actuadores. Esta regulación continua permitió reproducir condiciones ambientales estables durante periodos prolongados de tiempo, lo cual resulta fundamental en procesos biológicos como el cultivo de hongos.

B. Filosofía de control

El sistema de control se estructuró mediante una arquitectura de lazo cerrado, donde a cada variable ambiental se le asignó un lazo de control independiente (véase Figura 5). La estrategia adoptada fue de tipo modular, en la cual cada lazo se integró por los bloques de referencia, controlador, planta y sistema de medición, conforme al esquema general de control realimentado.

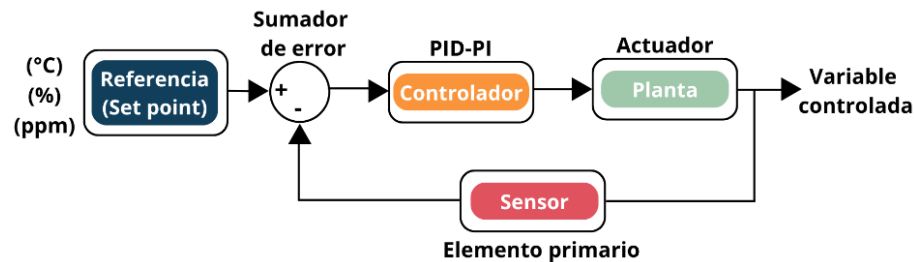


Fig. 5. Diagrama esquemático de lazo de control.

Desde el punto de vista matemático, la dinámica de cada variable fue representada mediante funciones de transferencia obtenidas a partir de pruebas experimentales a lazo abierto. Los modelos identificados correspondieron a sistemas de primer o segundo orden, descritos por las ecuaciones generales (6) y (7):

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (6)$$

para modelos de primer orden, y

$$G(s) = \frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (7)$$

para modelos de segundo orden, donde K representa la ganancia del sistema, τ la constante de tiempo, y a_0 , a_1 , b los coeficientes dinámicos obtenidos mediante ajuste matemático.

La identificación de estas funciones de transferencia se realizó mediante los métodos de mínimos cuadrados y de distancias ortogonales, seleccionándose en cada caso el modelo que presentó el menor error respecto a la respuesta experimental. El esquema de control empleado para cada variable se definió mediante controladores de tipo PI o PID. La selección del tipo de controlador se realizó en función de la dinámica identificada de cada planta y de los criterios de desempeño establecidos.

En el caso del control de la temperatura, la dinámica del sistema fue representada adecuadamente por un modelo de primer orden, lo que justificó el uso de un controlador PID para mejorar la rapidez de respuesta y reducir el error en estado estacionario. A continuación, se muestra la respuesta de la temperatura ante una entrada escalón a lazo cerrado (véase Figura 6).

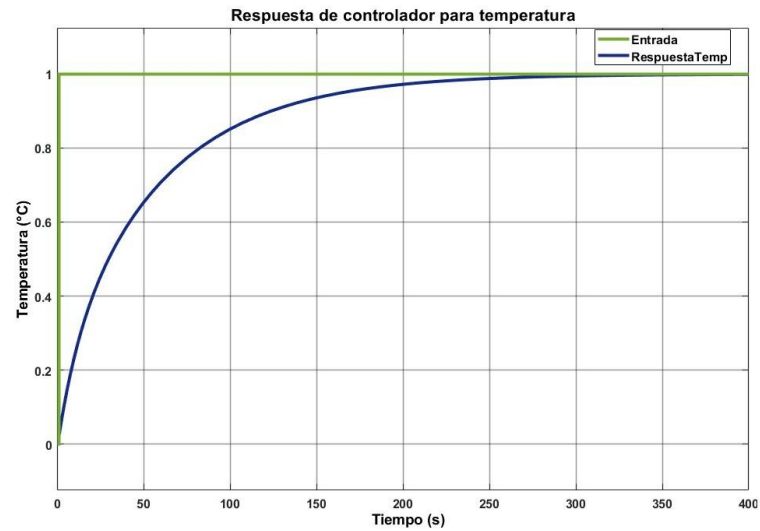


Fig. 6. Respuesta del lazo de control de temperatura.

Para la humedad relativa, la planta presentó una ganancia negativa, asociada al carácter inverso del proceso de extracción de humedad; en este caso, el control se formuló mediante una acción inversa respecto al error, para estabilizar la variable alrededor del punto de referencia (véase Figura 7). En este lazo se empleó también un controlador PID.

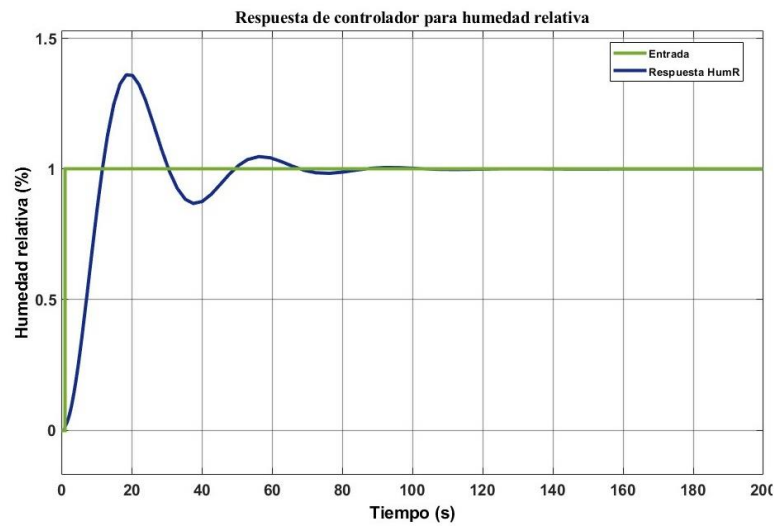


Fig. 7. Respuesta del lazo de control de humedad relativa.

Por su parte, el control de la concentración de CO_2 se basó en un modelo de segundo orden, lo que motivó la implementación de un controlador PI, para una respuesta rápida ante excesos de concentración y evitar oscilaciones innecesarias en el sistema de ventilación (véase Figura 8).

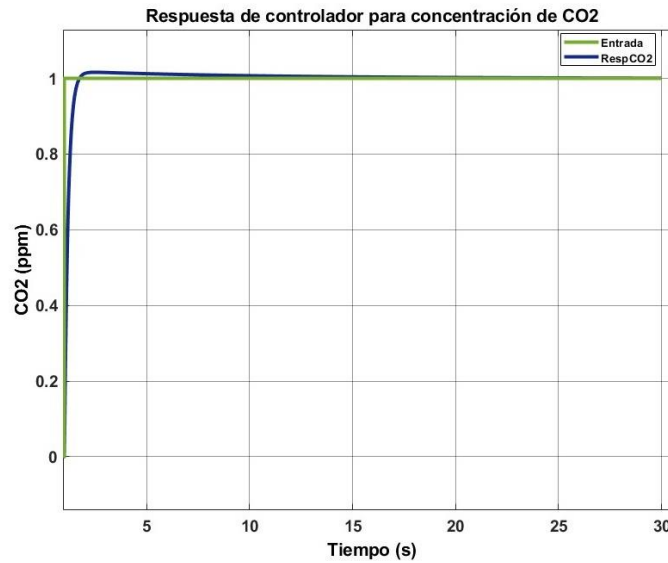


Fig. 8. Respuesta del lazo de control de concentración de CO₂.

11

En conjunto, la filosofía de control adoptada permite regular de forma estable y autónoma las variables ambientales del hábitat. La combinación de identificación dinámica, control modular y sintonización por asignación de polos proporciona una estrategia robusta y reproducible, adecuada para sistemas de cultivo automatizados de pequeña y mediana escala.

Es importante señalar que las respuestas de los lazos de control presentadas en las Figuras 6, 7 y 8 corresponden a pruebas de validación dinámica del diseño de los controladores, realizadas para verificar la estabilidad, rapidez de respuesta y error en estado estacionario de cada variable ambiental. Dichas gráficas no representan directamente la evolución temporal de las variables durante el ciclo completo de cultivo, sino que permiten confirmar que la estrategia de control implementada es capaz de regular de forma adecuada cada variable alrededor de su punto de referencia bajo condiciones controladas.

C. Criterios de comparación entre sistemas

La comparación entre el sistema automatizado y el sistema artesanal se realizó en consideración de los resultados finales de producción y el comportamiento temporal de las variables ambientales durante el ciclo de cultivo. En el sistema artesanal, la regulación de la temperatura, la humedad relativa y la ventilación dependió del ajuste manual y de las condiciones ambientales externas, lo que generó variaciones amplias a lo largo del tiempo.

En contraste, el sistema automatizado permitió mantener dichas variables dentro de rangos estrechos alrededor de los valores de referencia establecidos, mediante la aplicación continua de la estrategia de control descrita. Esta diferencia en la estabilidad temporal del microclima constituyó uno de los principales criterios de comparación entre ambos métodos, complementando el análisis de rendimiento y calidad del producto final.

III. RESULTADOS OBTENIDOS

Para el desarrollo de este estudio se implementó un sistema embebido orientado a la adquisición y análisis de señales PPG, diseñado específicamente para evaluar parámetros de frecuencia cardíaca (BPM) y variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV). El sistema está compuesto por un microcontrolador PSoC 4200M (modelo CY8C4247AZI-M485) encargado de adquirir la señal analógica proveniente de la salida de un JFET 2N5457 en conjunto con un LED como fotosensor, para procesar localmente y transmitir los datos hacia una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada en Python mediante la biblioteca PyQt5. La GUI permite la visualización en tiempo real de la señal PPG, el cálculo de métricas cardíacas y la exportación de los datos adquiridos en formato CSV. Además, el sistema cuenta con una máquina de estados y un protocolo de comandos para iniciar y detener la adquisición de manera controlada, garantizando así una interacción estable entre el firmware y el entorno de análisis. La frecuencia de muestreo fue configurada a 500 Hz, permitiendo una resolución adecuada para el análisis detallado de la señal y sus variaciones.

En la Tabla 1 se presenta una comparación técnica entre familias PSoC 4 (4200M), PSoC 5LP y PSoC 6. Aunque el PSoC 5LP se destaca como la mejor opción para procesamiento analógico gracias a su combinación de ADCs Delta-Sigma de alta resolución, múltiples Opamps, Mixers analógicos y un módulo de filtrado digital (DFB), en este trabajo se utilizó el PSoC 4200M debido a su disponibilidad en el laboratorio. Esta familia, a pesar de sus limitaciones frente al 5LP, ofrece un núcleo Cortex-M0 y bloques analógicos suficientes para implementar de manera eficiente el filtrado analógico de señales PPG. En comparación, el PSoC 6 representa una evolución significativa con capacidades de procesamiento dual y mayor rendimiento, pero carece de algunas herramientas analógicas dedicadas que distinguen al 5LP como la mejor opción cuando se prioriza el tratamiento analógico de la señal.

12

En la Fig. 1, se muestra el esquema experimental utilizado en el presente trabajo. Aquí se muestran los módulos principales: Señal PPG (salida Filtro pasa altas), Temporizador (SamplingTimer), UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), Opamp y un ADC (ADC_SAR_1), los cuales son descritos a continuación.

Durante la etapa de incubación (15 días), el sistema automatizado mantuvo las variables ambientales cercanas a los valores de referencia establecidos. La Tabla 1 resume los valores promedio registrados y su comparación con el sistema testigo.

TABLA 1
VARIABLES AMBIENTALES PROMEDIO DURANTE LA INCUBACIÓN

Sistema	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	CO ₂ (ppm)	Días
Testigo (artesanal)	22.31	28.68	—	15
Automatizado	28.06	65.31	937.28	15

La Figura 9 muestra el comportamiento temporal de la temperatura durante la incubación, donde se observa que el sistema automatizado mantuvo el valor cercano al *setpoint* de 28°C, con variaciones menores a $\pm 1^{\circ}\text{C}$, mientras que el sistema testigo presentó fluctuaciones asociadas a las condiciones ambientales externas.

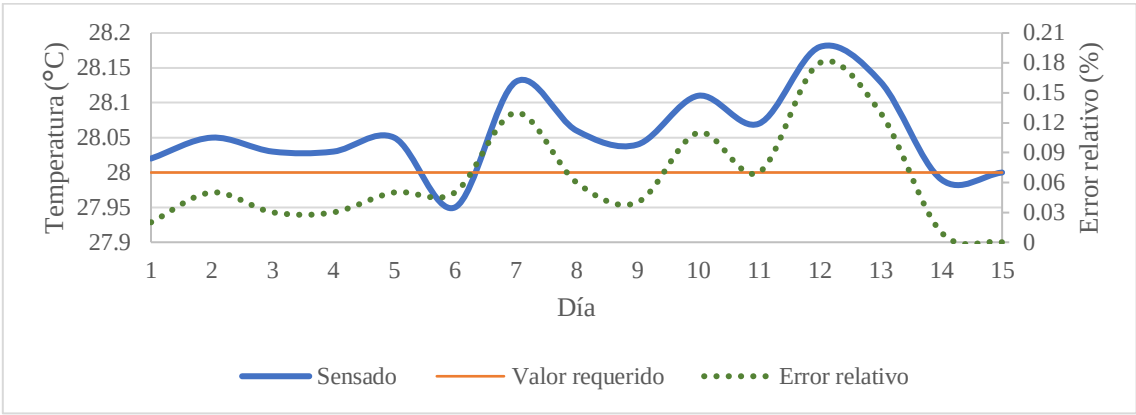


Fig. 9. Registro de temperatura.

La Figura 10 presenta la evolución de la humedad relativa, donde se muestra que el sistema automatizado logró mantener un nivel estable cercano al 65%, condición indispensable para el desarrollo micelial.

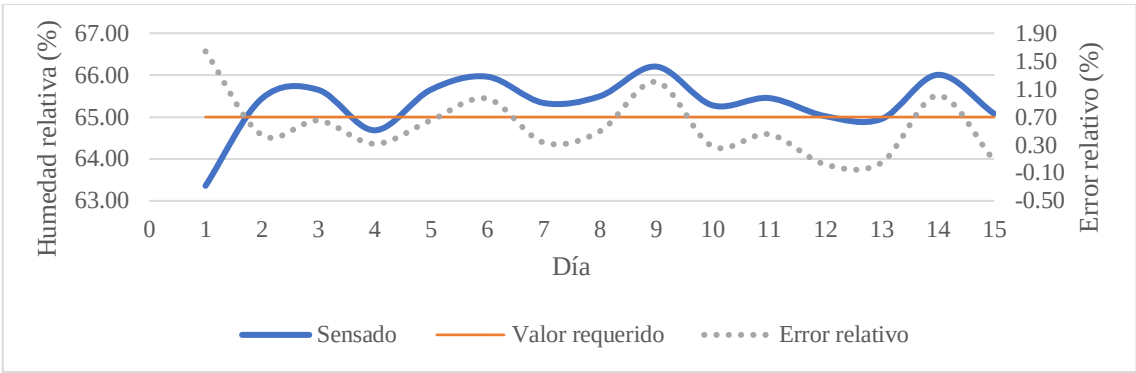


Fig. 10. Registro de humedad relativa

Durante la etapa de fructificación (15 días para el microclima y 20 para el testigo), el sistema automatizado ajustó automáticamente los parámetros ambientales conforme a los requerimientos fisiológicos de *Pleurotus djamor*. Los valores promedio registrados se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2
VARIABLES AMBIENTALES PROMEDIO DURANTE LA FRUCTIFICACIÓN

Sistema	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	CO ₂ (ppm)	Días
Testigo (artesanal)	23.18	38.13	—	20
Automatizado	24.59	83.09	842.44	15

Se realizó una comparativa visual entre el sistema de cultivo artesanal utilizado como testigo y el sistema de cultivo automatizado (véase Figura 11). En dicha comparativa se obtuvieron imágenes representativas del desarrollo de los cuerpos fructíferos en ambos sistemas, tomadas bajo las mismas condiciones de observación y en instantes equivalentes del ciclo productivo. Las imágenes permitieron evidenciar de manera cualitativa las diferencias en el ritmo de

crecimiento, la uniformidad del desarrollo, el tamaño de los sombreros y la morfología general de las setas, lo que constituye un complemento visual al análisis cuantitativo de producción y eficiencia biológica obtenido durante la etapa de fructificación.

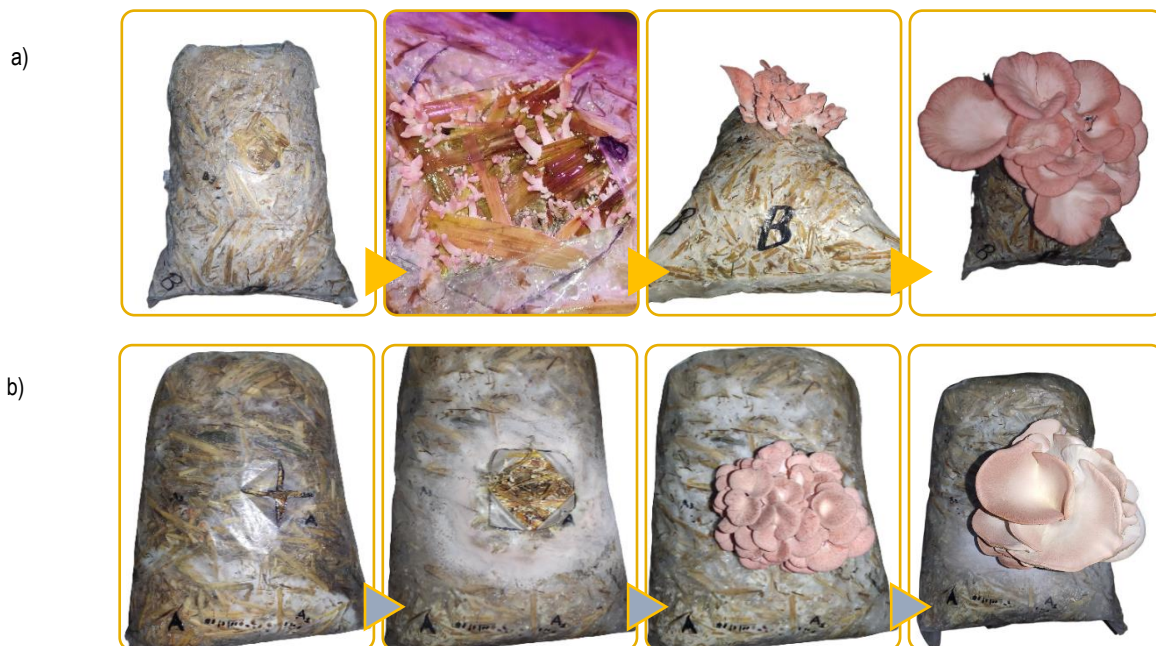


Fig. 11. Avance de fructificación: a) En hábitat y b) testigo artesanal.

El sistema automatizado permitió una producción sostenida a lo largo de seis cosechas por bolsa de cultivo, lo que evidenció un mejor aprovechamiento del sustrato y una prolongación de la fase productiva. En contraste, el sistema testigo artesanal únicamente alcanzó dos cosechas por bolsa, para una disminución temprana en la capacidad de producción. En la Figura 12 se observa la recolección de los cuerpos fructíferos en ambos sistemas, tanto en el hábitat automatizado como en el cultivo testigo, lo que permitió documentar visualmente las diferencias en cantidad, tamaño y uniformidad de las setas obtenidas durante cada corte.

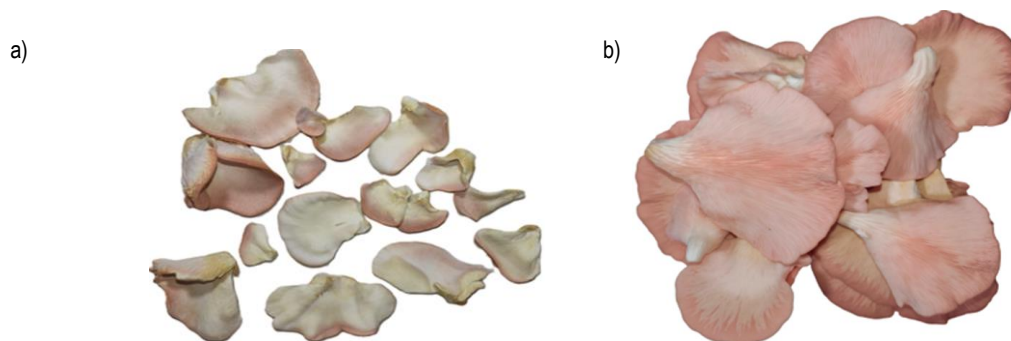


Fig. 12. Recolección del cuerpo fructífero: a) Testigo artesanal y b) Hábitat.

La Tabla 3 presenta la producción total de cuerpos fructíferos obtenida en el sistema automatizado y en el sistema testigo artesanal al término del ciclo de cultivo. Esta comparación muestra el impacto del control automático del microclima sobre el rendimiento global, con una diferencia significativa en la masa total producida entre ambos sistemas.

TABLA 3
PRODUCCIÓN TOTAL DE CUERPOS FRUCTÍFEROS

Sistema	Cosechas	Masa total (kg)
Testigo (artesanal)	6 (2 por bolsa)	0.451
Automatizado	18 (6 por bolsa)	2.49

La eficiencia biológica (EB) se calculó como la relación porcentual entre la masa de cuerpos fructíferos obtenida y la masa seca del sustrato. Los resultados por bolsa se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4
EFICIENCIA BIOLÓGICA OBTENIDA

Bolsa	EB sistema testigo (%)	EB sistema automatizado (%)
1	21.9	86.51
2	11.5	83.50
3	11.7	78.99
Promedio	15.03	83.00

Se realizaron pruebas organolépticas que consistieron en la evaluación cualitativa de las características sensoriales de los cuerpos fructíferos obtenidos, con el propósito de analizar su calidad desde el punto de vista visual, táctil y sensorial. En estas pruebas se consideraron atributos como color, tamaño del sombrero, longitud del pie, textura, aroma y percepción del sabor, para identificar diferencias asociadas a las condiciones de cultivo. Este análisis se enfoca en una valoración integral de la calidad de las setas producidas en el sistema automatizado y en el sistema testigo artesanal. Las pruebas organolépticas evidenciaron diferencias claras entre los cuerpos fructíferos obtenidos en ambos sistemas. La Tabla 5 resume los principales resultados.

TABLA 5
COMPARACIÓN DE CALIDAD SENSORIAL DE LOS CUERPOS FRUCTÍFEROS

Característica	Sistema testigo	Sistema automatizado
Color	Blanco rosado	Rosa-salmón
Sombrero	Mediano	Grande
Pie	Alargado	Corto
Textura	Seca y fibrosa	Húmeda y suave
Aroma	Ausente	Intenso
Sabor	Débil	Umami

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirmaron que el control automático del microclima influyó de manera determinante en el desempeño productivo del cultivo de *Pleurotus djamor*. La estabilidad lograda en las variables ambientales durante las etapas de incubación y fructificación permitió reproducir condiciones óptimas de crecimiento, lo que se reflejó en un incremento significativo tanto en la producción de cuerpos fructíferos como en la eficiencia biológica del sistema.

Durante la etapa de incubación, el sistema automatizado mantuvo la temperatura y la humedad relativa dentro de los rangos recomendados para el desarrollo micelial. Este comportamiento contrastó claramente con el sistema testigo artesanal, donde la baja humedad relativa y las fluctuaciones térmicas limitaron la colonización del sustrato. Resultados similares fueron reportados por [10], quienes señalaron que la inestabilidad ambiental en sistemas tradicionales afecta negativamente la expansión del micelio y reduce el rendimiento posterior del cultivo. En este estudio, la colonización homogénea observada en el sistema automatizado explicó la diferencia significativa en la productividad registrada en las etapas posteriores.

Los valores promedio de temperatura y humedad relativa alcanzados durante la incubación en el sistema automatizado se encuentran dentro de los rangos comúnmente reportados para especies del género *Pleurotus*, donde se señalan temperaturas cercanas a 25-30°C y humedades relativas superiores al 60 % como condiciones favorables para la expansión micelial. En comparación con estos estudios, el comportamiento observado en el sistema propuesto mostró una estabilidad equivalente o superior, lo que contribuyó a una colonización más eficiente del sustrato.

16

En la etapa de fructificación, el control automático de la humedad relativa resultó ser uno de los factores más relevantes. Adicionalmente, la regulación de la concentración de dióxido de carbono mediante ventilación controlada resulta un aspecto crítico durante la fructificación, ya que la acumulación de CO₂ es un fenómeno inherente al metabolismo del cultivo y puede afectar el desarrollo morfológico de los cuerpos fructíferos [15]. Mientras que el sistema testigo presentó valores promedio cercanos al 38 %, el sistema automatizado mantuvo niveles superiores al 80 %, condición indispensable para la formación de primordios y el desarrollo adecuado de los cuerpos fructíferos. El número de cosechas obtenidas constituye otro indicador relevante del impacto del sistema automatizado. En el presente estudio se alcanzaron seis cosechas por bolsa, frente a únicamente dos en el sistema artesanal. Este comportamiento evidenció un aprovechamiento más eficiente del sustrato, asociado a la estabilidad del microclima durante todo el ciclo productivo. En [11] se señaló que los sistemas autónomos de control ambiental favorecen una fructificación sostenida en el tiempo, lo cual coincide con los resultados aquí obtenidos.

El número de cosechas obtenidas por bolsa en el sistema automatizado es comparable e incluso superior a lo reportado en estudios donde se emplean sistemas de control ambiental básico o monitoreo pasivo, en los cuales la fase productiva suele limitarse a dos o tres cortes. Esta diferencia pone de manifiesto que la estabilidad del microclima no solo incrementa la producción total, sino que prolonga la vida productiva del sustrato.

La eficiencia biológica promedio del 83 % alcanzada por el sistema automatizado se ubicó dentro del rango superior reportado para el cultivo de especies del género *Pleurotus*, donde se documentan eficiencias típicas entre 60 % y 85 % bajo condiciones de control ambiental [16]. En contraste, el valor obtenido en el sistema artesanal se ubicó muy por debajo de dichos rangos, lo que evidencia el impacto directo del control automático del microclima sobre la conversión eficiente del sustrato en biomasa útil.

Desde el punto de vista de la calidad sensorial, las diferencias observadas entre ambos sistemas reforzaron la importancia del control ambiental. Las setas producidas bajo el sistema automatizado presentaron coloración aceptable, mayor tamaño de sombrero, textura húmeda y un perfil organoléptico superior al testigo. Diversos estudios han

señalado que las condiciones ambientales durante la etapa de fructificación influyen directamente en la morfología y calidad física de los cuerpos fructíferos, particularmente en el tamaño del sombrero, la textura y la uniformidad del desarrollo [17].

Un aspecto relevante de este trabajo fue la integración de una estrategia de control jerárquico con modos de operación diferenciados por etapa de cultivo. A diferencia de otros estudios centrados principalmente en el monitoreo, el sistema desarrollado permitió actuar de forma priorizada sobre las variables críticas, lo que garantizó una respuesta rápida ante desviaciones del *setpoint*. Esta característica representó una ventaja frente a sistemas que únicamente notifican cambios ambientales sin ejecutar acciones correctivas automáticas.

Finalmente, los resultados demostraron que es posible implementar un sistema de control de microclima eficiente, reproducible y con el uso de microcontroladores comerciales, sensores integrados y plataformas de monitoreo remoto de bajo costo. Esta aproximación resulta especialmente relevante para productores a pequeña y mediana escala, ya que reduce la dependencia de la experiencia empírica y permite estandarizar las condiciones de cultivo sostenible de *Pleurotus djamor*.

Se identificaron diversas líneas de trabajo futuro orientadas a mejorar el alcance del sistema. En primera instancia, se plantea la integración de sensores específicos para la medición del consumo energético. La inclusión de estas variables permitiría realizar un análisis detallado del impacto del control ambiental sobre el consumo de recursos para el desarrollo de estrategias de optimización energética del hábitat. Asimismo, se propone evaluar el desempeño del sistema automatizado en el cultivo de otras especies del género *Pleurotus* u hongos comestibles con requerimientos ambientales distintos. Esta extensión permitiría validar la adaptabilidad del sistema y su potencial como plataforma modular para diferentes escenarios productivos en contextos agrícolas diversos.

Desde el punto de vista del control, la implementación y comparación de estrategias avanzadas, tales como control predictivo basado en modelo (MPC) o control adaptativo permitiría identificar mejoras en términos de rapidez de respuesta, estabilidad y robustez ante perturbaciones externas. Adicionalmente, se considera pertinente el desarrollo de una etapa de validación a largo plazo que contemple múltiples ciclos productivos consecutivos. Esta evaluación permitiría analizar la durabilidad de los componentes electrónicos, la estabilidad del sistema de control en operación continua y el comportamiento del cultivo frente a variaciones estacionales.

V. CONCLUSIONES

El sistema diseñado operó de manera autónoma y mantuvo las variables críticas dentro de los rangos definidos para las etapas de incubación y fructificación, sin requerir intervención manual constante. Los resultados obtenidos evidenciaron que la automatización del microclima incrementó la producción total de cuerpos fructíferos y prolongó la fase productiva del sustrato. Este comportamiento indicó un aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles y una reducción del impacto de factores ambientales externos que tradicionalmente limitan el cultivo artesanal.

El incremento significativo en la eficiencia biológica alcanzada por el sistema automatizado confirmó que el control de la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono constituye un factor determinante para optimizar la conversión del sustrato en biomasa útil. En este sentido, el sistema propuesto se posicionó como una alternativa técnicamente viable para mejorar el rendimiento del cultivo sin incrementar de forma significativa la complejidad operativa.

La arquitectura basada en microcontrolador, sensores integrados y actuadores eléctricos de bajo costo demostró ser adecuada para aplicaciones agrícolas a pequeña escala. La estrategia de control jerárquico permitió priorizar la corrección de las variables críticas en cada momento del proceso, lo que aseguró una respuesta estable ante perturbaciones y transiciones entre etapas de cultivo.

Adicionalmente, la implementación de interfaces de monitoreo remoto facilitó la supervisión del sistema y la gestión de parámetros operativos, lo que redujo la dependencia de la experiencia empírica del productor. Esta característica aportó un valor adicional al sistema, al permitir su operación continua y su adaptación a distintos escenarios productivos. En conjunto, los resultados confirmaron que el control automático del microclima constituye una herramienta eficaz para mejorar la productividad, la eficiencia biológica y la calidad del cultivo de *Pleurotus djamor*.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Conceptualization: ODH; JJNC; Methodology: MAPR; Software: ODH; Investigation: ODH; JJNC; Writing-original draft preparation MAPR; Writing-review and editing: AJPN; Supervision: MAPR; Formal analysis: ODH; JJNC; Project administration: MAPR; Funding acquisition: AJPN.

Funding: The authors declare that no external funding was received.

Data Availability Statement: The data are available within the article.

Acknowledgments: The authors acknowledge the Instituto Politécnico Nacional and the Secretaría de Investigación y Posgrado through the SIP Project 20251296 for supporting the development of this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

18

REFERENCIAS

- [1] K. Miśkiewicz, D. Gendaszewska, K. Sieczyńska, et al., “Agri-food wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation and their agricultural potential,” *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 42617, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26843-y>
- [2] R. S. Jarial, K. Jarial, J. N. Bhatia, “Comprehensive review on oyster mushroom species (Agaricomycetes): Morphology, nutrition, cultivation and future aspects,” *Heliyon*, vol. 10, no. 5, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26539>
- [3] S. Patil, S. Chonde, G. Pathade, “Production of mushrooms: A short review,” *Ecology, Environment and Conservation*, vol. 30, pp. 296–304, 2024, <https://doi.org/10.53550/EEC.2024.v30i02s.061>
- [4] H. T. Hoa, C. Wang, “The effects of temperature and nutritional conditions on mycelium growth of oyster mushroom *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus*,” *Food Technology and Biotechnology*, 2015, <https://doi.org/10.5941/myco.2015.43.1.14>
- [5] C. Sánchez, “Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 85, no. 5, pp. 1321–1337, 2010, <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- [6] P. Badoni, S. A. Siddiqui, “Metamorphosis of mushroom production from tradition to automation,” *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 9, Art. no. 974, 2025, <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07517-w>
- [7] R. R. Shamshiri, J. W. Jones, K. R. Thorp, D. Ahmad, H. Che Man, S. Taheri, “Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of agricultural crops,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 150, pp. 239–257, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.010>

- [8] A. R. Villafuerte, et al., “Precision microclimate control using IoT for enhanced production of *Pleurotus ostreatus*,” in IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, vol. 1572, no. 1, Art. no. 012016, 2025, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1572/1/012016>
- [9] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, E. H. M. Aggoune, “Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1788–1818, 2019, <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2932620>
- [10] M. Rukhiran, C. Sutanthavibul, S. Boonsong, P. Netinant, “IoT-based mushroom cultivation system with solar renewable energy integration: Assessing the sustainable impact of the yield and quality,” *Sustainability*, vol. 15, no. 18, Art. no. 13968, 2023, <https://doi.org/10.3390/su151813968>
- [11] Ž. Kavaliauskas, et al., “Intelligent control of mushroom growing conditions using an electronic system for monitoring and maintaining environmental parameters,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, Art. no. 13040, 2022, <https://doi.org/10.3390/app122413040>
- [12] A. Sivagami, M. A. Kandavalli, B. Yakkala, “Design and evaluation of an automated monitoring and control system for greenhouse crop production,” in *Next-Generation Greenhouses for Food Security*, IntechOpen, 2021, <https://doi.org/10.5772/intechopen.97316>
- [13] A. Mellit, et al., “Design of a novel remote monitoring system for smart greenhouses using the internet of things and deep convolutional neural networks,” *Energies*, vol. 14, no. 16, Art. no. 5045, 2021, <https://doi.org/10.3390/en14165045>
- [14] Y. Kim, R. G. Evans, W. M. Iversen, “Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 7, pp. 1379–1387, 2008, <https://doi.org/10.1109/TIM.2008.917198>
- [15] M.-A. Meilleur, D. Bastien, D. Monfet, “Modeling Mushrooms’ Carbon Dioxide Emission and Heat Exchange Rates for Synergistic Cultivation with Leafy Greens,” *Sustainability*, vol. 15, no. 24, Art. no. 16740, 2023, <https://doi.org/10.3390/su152416740>
- [16] A. N. Philippoussis, “Production of mushrooms using agro-industrial residues as substrates,” in *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation: Utilisation of Agro-Residues*, Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 163–196, 2009, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9942-7_7
- [17] D. J. Royse, J. Baars, Q. Tan, “Current overview of mushroom production in the world,” in *Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications*, pp. 5–13, 2017, <https://doi.org/10.1002/9781119149446.ch2>