

Tecnologías IOT aplicadas al cultivo de *pleurotus ostreatus*, hongo de relevancia nutricional y terapéutica, en ambientes controlados

IOT Technologies applied to the cultivation of *pleurotus ostreatus*, a mushroom of nutritional and therapeutic relevance, in controlled environments

Gabriel Andrés Obando¹, Edgar Rodrigo Enríquez², Germán Geovanny Gómez³

Resumen

Objetivo. Evaluar el impacto de un sistema automatizado de monitoreo y control ambiental, basado en tecnologías IoT, sobre la productividad del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*, de relevancia nutricional y terapéutica, cultivado en Obonuco (Nariño, Colombia), utilizando residuos agropecuarios locales como cáscara de arveja, rastrojos de maíz, pasto kikuyo, aserrín, salvado de trigo y carbonato de calcio. **Método.** Consistió en el desarrollo de cuatro etapas con diferentes niveles de automatización para el control de la temperatura y la humedad relativa, mediante la integración de sensores DHT11, controladores Arduino, base de datos en línea, electroválvulas, tomacorrientes inteligentes y dispositivos móviles. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.001$) para determinar el efecto del tipo de sustrato y del nivel de automatización sobre los días de incubación y la eficiencia biológica. **Resultados.** El incremento del nivel de automatización generó disminución de los días de incubación de 29 a 24 días, mientras que la eficiencia biológica aumentó de 29,7 % a 53,6 %. El tratamiento T5, compuesto por una mezcla balanceada de residuos con un 9 % de semilla, fue el más eficiente bajo condiciones de automatización total. **Conclusión,** la automatización del cultivo mediante tecnologías IoT mejora significativamente la productividad del *Pleurotus ostreatus*, optimiza las

¹ BIOTICS, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pasto, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5751-9837>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=XtZuyucAAAAJ&hl=es>

² DAVINCI, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pasto, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0667-5960>

³ DAVINCI, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pasto, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-5484>

Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=_CF6BWpnzRQC

Correspondencia: gabriel.obando@unad.edu.co

condiciones ambientales y representa una solución escalable para pequeños productores, aportando a la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y la innovación tecnológica en el sector agroalimentario.

Palabras clave: Alimento funcional; Internet de las Cosas (IoT); Seguridad alimentaria; Valor nutritivo.

Abstract

Objective. To evaluate the impact of an automated environmental monitoring and control system, based on IoT technologies, on the productivity of the edible mushroom *Pleurotus ostreatus*, which is nutritionally and therapeutically important, cultivated in Obonuco (Nariño, Colombia), using local agricultural waste such as pea husks, corn stover, kikuyo grass, sawdust, wheat bran, and calcium carbonate. **Method.** It consisted of the development of four stages with different levels of automation for temperature and relative humidity control, through the integration of DHT11 sensors, Arduino controllers, an online database, solenoid valves, smart outlets, and mobile devices. Analysis of variance (ANOVA) and Tukey's multiple comparison tests ($p < 0.001$) were applied to determine the effect of substrate type and automation level on incubation days and biological efficiency. **Results.** The increase in the level of automation led to a decrease in incubation days from 29 to 24 days, while biological efficiency increased from 29.7% to 53.6%. Treatment T5, consisting of a balanced mixture of waste with 9% seed, was the most efficient under conditions of total automation. **Conclusion:** Automating cultivation using IoT technologies significantly improves the productivity of *Pleurotus ostreatus*, optimizes environmental conditions, and represents a scalable solution for small producers, contributing to sustainability, food security, and technological innovation in the agri-food sector.

Keywords: Functional food; Internet of Things (IoT); Food security; Nutritional value.

Introducción

El hongo comestible *Pleurotus ostreatus*, comúnmente conocido como ostra u Orellana, ha despertado un creciente interés en los últimos años debido a su excepcional perfil nutricional y funcional, el cual posee un alto contenido de proteínas de buena calidad, bajo en grasas, rico en fibra dietaria, vitaminas (especialmente del complejo B y vitamina C) así como minerales esenciales como hierro, potasio, fósforo y magnesio. Además contiene compuestos bioactivos como polisacáridos β -glucanos y lovastatina, con propiedades antioxidantes, hipocolesterolémicas e inmunomoduladoras (1,2). Su bajo contenido calórico y la ausencia de colesterol lo convierten en un alimento ideal para personas con dietas hipolipemiantes o vegetarianas. Por otra parte, *P. ostreatus* se ha posicionado como un ingrediente clave en el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos, gracias a su potencial para prevenir enfermedades metabólicas crónicas (3). Investigaciones recientes también han demostrado su contenido de vitamina B12, lo cual es especialmente relevante en dietas veganas, donde dicha vitamina suele escasear (2).

En comparación con alimentos tradicionales, *Pleurotus ostreatus* demuestra cualidades nutricionales y terapéuticas que compiten favorablemente con productos de origen animal y vegetal; por ejemplo, el contenido proteico de este hongo es similar

al de los frijoles y puede alcanzar niveles comparables a los de la leche o incluso a ciertos cortes magros de carne bovina, con la ventaja adicional de no contener grasas saturadas ni colesterol (4); en términos de biodisponibilidad, la proteína fúngica tiene una tasa de digestibilidad superior al 70%, lo que la convierte en una opción efectiva para complementar dietas proteicas de origen vegetal (5). Adicionalmente, mientras la leche y la carne requieren cadenas de producción altamente demandantes en términos ambientales, el cultivo de *P. ostreatus* puede realizarse en condiciones más sostenibles, con un menor impacto ambiental y un aprovechamiento más eficiente de los recursos.

Desde una perspectiva productiva, la versatilidad del cultivo de *Pleurotus ostreatus* se manifiesta en su capacidad de crecer en una amplia gama de residuos agroindustriales como paja de trigo, bagazo de caña, tusa de maíz, aserrín y cáscaras de leguminosas, convirtiéndolo en un aliado clave en estrategias de economía circular y agricultura sostenible (5). Esta característica permite su adaptación a diversas regiones agroecológicas y sistemas de producción, desde cultivos artesanales en zonas rurales hasta instalaciones tecnificadas controladas por IoT (3), consecuentemente, su rápido ciclo de vida, alta tasa de conversión de sustrato en biomasa comestible, y facilidad de manejo postcosecha lo posicionan como una alternativa viable para la

seguridad alimentaria y el desarrollo rural (6-10). La posibilidad de integrar prácticas agroecológicas, tecnologías de precisión y el aprovechamiento de residuos orgánicos, consolida al *Pleurotus ostreatus* como un modelo de innovación sostenible con alto valor nutricional y social.

También es importante destacar el creciente interés por el valor nutricional y terapéutico de *Pleurotus ostreatus*, pues diversas investigaciones en el contexto colombiano han resaltado su versatilidad frente a entornos no convencionales y su capacidad de adaptación a sustratos derivados de residuos agroindustriales. En este sentido, un estudio evaluó la productividad del hongo en la región de Supía (Caldas), empleando sustratos alternativos como cascarilla de café, bagazo de caña y cáscara de plátano, logrando eficiencias biológicas superiores al 70 %, lo que evidencia el potencial de este hongo como agente clave en la valorización de residuos locales (7). En otro estudio se demostró la capacidad degradadora in vitro de *P. ostreatus* frente a hidrocarburos pesados, lo cual amplía su relevancia no solo como alimento funcional, sino también como agente de biorremediación en contextos ambientalmente críticos (8). Estas experiencias reafirman la pertinencia de investigaciones que integren tecnologías emergentes con procesos biotecnológicos basados en hongos comestibles y sostenibilidad local.

La incorporación de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura ha permitido optimizar procesos y mejorar la productividad en diferentes sistemas de cultivo, incluyendo el de hongos comestibles. El uso de sensores conectados que monitorean variables críticas como la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂, en tiempo real, ha demostrado ser eficaz en el control ambiental del cultivo de *Pleurotus ostreatus*, permitiendo ajustes precisos que reducen los tiempos de incubación y aumentan la eficiencia biológica del proceso (9). Diversos estudios han evidenciado que la implementación de sistemas de automatización basados en microcontroladores y sensores no solo estabiliza las condiciones del entorno, sino que también disminuye el riesgo de contaminaciones y optimiza el uso de recursos como agua y energía (10). Esta digitalización del cultivo facilita la escalabilidad para pequeños productores, promoviendo la sostenibilidad e inclusión tecnológica en el sector agroalimentario (11,12).

Materiales y métodos

La evaluación del impacto del control automatizado de las variables de humedad relativa y temperatura, se realizó en el corregimiento de Obonuco, Pasto-Nariño, Colombia, tomando residuos agrícolas que se utilizaron como sustrato, los cuales se recolectaron en diferentes zonas habitacio-

nales del corregimiento desde inicios del año 2022 hasta finales del 2023, utilizando para el proceso de cultivo la estructura construida en el proyecto de producción artesanal de *Pleurotus ostreatus* (13).

Adecuación del sustrato e inoculación

Para la metodología de siembra se tomó el experimento con mejores resultados de acuerdo a la investigación previa realizada por (13). Los experimentos se realizaron tomando como sustrato: cáscara de arveja (CA), rastrojos del cultivo de maíz (RM), pastos Kikuyo (KK), aserrín (AS) constituido principalmente por desechos de Achapo (*Cedrelinga catenaeformis*), Chanúl (*Humiriastrium procera*), salvado de trigo (ST), y la adición de carbonato de calcio CaCO_3 , en aislamiento térmico con icopor, realizando variación del porcentaje de inoculación en relación al peso del sustrato.

Posterior al secado de los sustratos, los residuos de cosechas y los pastos, se cortaron con tijera a un tamaño de partícula entre 3 y 6 cm de largo. Este procedimiento se hizo para cada tratamiento y se evitó el almacenamiento para evitar contaminación y plagas. Todos los residuos se sometieron a lavado en hipoclorito al 1% y se dejó en remojo durante dos horas, luego se escurrieron en zarandas durante dos horas más para obtener una humedad del sustrato de (59,5% y 65,3%) y el valor de pH entre 6 y 7 utilizando CaCO_3 al 1% del peso

del sustrato en base seca. Posteriormente, el tratamiento se sometió a calentamiento durante dos horas para esterilizar con vapor de agua a una temperatura de $89 \pm 2^\circ\text{C}$ en contacto directo, utilizando una estufa convencional utilizando gas propano como fuente de energía.

Una vez completado el proceso de preparación y esterilización de los sustratos, se procedió a la inoculación utilizando semilla comercial de laboratorio (hongos de Merlín) de *Pleurotus ostreatus* sobre maíz seco. Se incorporaron diferentes proporciones con base en el peso seco del sustrato para las etapas 1 a 3 del experimento, mientras que en la etapa 4 se aplicó una única proporción que fue la considerada optima de acuerdo con la experimentación llevada a cabo en las etapas previas. La mezcla se realizó bajo condiciones asépticas, integrando la semilla con los sustratos previamente preparados, los cuales fueron envasados en bolsas selladas. La Tabla 1 presenta en detalle las proporciones utilizadas, los tipos de sustrato y los porcentajes de semilla empleados en cada uno de los tratamientos.

Tabla 1. Relaciones de residuos empleados y cantidad de semilla usada en la producción de hongos Orellana generados en la comunidad de Obonuco, Nariño.

Experimentos	Sustratos	Tratamiento	Gramos	% Semilla
1 a 3	Cáscara de arveja CA Residuos del maíz RM Kikuyo KK Aserrín AS Salvado de trigo ST Carbonato de calcio CC al 1 % Paja de trigo PT (aislamiento térmico)	T1 al T6: KK + CA + RM + AS + ST relación 2:2:2:2:2 T7: PT (control)	T1 al T6: KK + CA + RM + AS + ST: 200 g + 200 g + 200 g + 200 g + 200 g T7: PT 1000 g	T1: 5 % (50 g) T2: 6 % (60 g) T3: 7 % (70 g) T4: 8 % (80 g) T5: 9 % (90 g) T6: 10 % (100 g) T7: 10 % (100 g)
4	Cáscara de arveja CA Residuos del maíz RM Kikuyo KK Aserrín AS Salvado de trigo ST Carbonato de calcio CC al 1 % Paja de trigo PT (aislamiento térmico)	T1 al T6: KK + CA + RM + AS + ST relación 2:2:2:2:2 T7: PT (control)	T1 al T6: KK + CA + RM + AS + ST: 200 g + 200 g + 200 g + 200 g + 200 g T7: PT 1000 g	T5: 9 % (90 g)

Sistema de control IoT

Para la implementación del sistema de control automatizado se realizaron diferentes disposiciones de equipos y dispositivos de medición, llevándose a cabo cuatro experimentos llamados “etapas”, denominación que obedece al grado de automatización aplicado en cada una de ellas.

Etapas 1:

En esta etapa del sistema de monitoreo, el sensado se hizo mediante el termohigrómetro de sonda, el control y actuador fue realizado por el investigador principal de forma manual.

Los datos de temperatura y humedad relativa se registraron cada dos horas, desde las 8:00 a.m. hasta las 6:00 p.m. momento en cual se realizaba el ajuste mediante el accionamiento de dos dispositivos; en el área de incubación, se activó manualmente un calentador de ambiente para mantener la temperatura cercana a los 25 °C. Sin embargo, no se realizó control sobre la humedad relativa, limitándose únicamente a registrar las condiciones ambientales; en el área de fructificación se realizó un ajuste manual de la humedad relativa, activando una válvula de aspersión hasta alcanzar aproximadamente un 90 % de humedad, no se realizó control sobre la temperatura, limitándose únicamente a registrar las condiciones ambientales.

Etapa 2:

En esta etapa del sistema de monitoreo, el sensado se hizo mediante un termohigrómetro digital con conexión al teléfono inteligente, el control y el ajuste fue realizado por el investigador del proyecto de forma manual al encender el calentador de ambiente y abrir la válvula de aspersión nebulizadora.

Se registraron los datos de temperatura y humedad relativa cada dos horas desde las 8 am hasta las 6 pm. La activación del calentador de ambiente se realizó manualmente una vez que se recibió la señal en el teléfono inteligente indicando una temperatura por debajo de 20°C, y se mantuvo encendido hasta alcanzar los 25°C, establecidos como el límite superior de temperatura para el recinto de incubación. En cuanto al área de fructificación, se procedió a abrir la válvula manualmente una vez que se recibió la señal en el teléfono inteligente cuando la humedad relativa marcaba por debajo del 80%. La válvula de aspersión se mantuvo abierta hasta alcanzar un valor del 90% de humedad relativa.

Etapa 3:

En esta etapa del sistema de monitoreo, la medición de las variables ambientales se realizó mediante un termohigrómetro digital con conexión a un teléfono inteligente. El control y la activación de los dispo-

sitivos fueron ejecutados de forma remota por el investigador principal, mediante el encendido de *switches* inteligentes, los cuales activaban el calentador de ambiente y la electroválvula, respectivamente.

Los datos de temperatura y humedad relativa se recopilaron cada dos horas, desde las 8:00 a. m. hasta las 6:00 p. m. La activación del calentador de ambiente se realizó mediante una señal enviada al teléfono inteligente cuando la temperatura descendía por debajo de los 20 °C. A través del teléfono, se activó el *smart switch*, el cual encendía el calentador hasta alcanzar los 25 °C en el área de incubación. En el área de fructificación, cuando se detectaba una humedad relativa inferior al 80 %, se activaba el *smart switch* mediante el teléfono inteligente, lo que a su vez activaba la electroválvula conectada al sistema de aspersión. Esta válvula permanecía en funcionamiento hasta alcanzar un valor del 90 % de humedad relativa.

Etapa 4:

En esta etapa se implementó el sistema automatizado de monitoreo, utilizando sensores DHT11 para temperatura y humedad relativa, junto con un módulo Arduino WiFi R1 D32, encargado de enviar la información a una base de datos alojada en un servidor de pruebas (*hosting*) accesible desde el sitio: siscom.erenriquez.com. Desde esta plataforma se realizó el seguimiento

en tiempo real de las condiciones ambientales. Para el control de los dispositivos, se emplearon relés de doble canal de 5 V, que activaban el calentador de ambiente para el control térmico, así como el humidificador y la electroválvula para la regulación de la humedad relativa.

Se conservaron las áreas de incubación y fructificación. Los datos fueron registrados automáticamente cada 4 minutos, durante las 24 horas del día. En el área de incubación, los dispositivos se activaban de acuerdo con valores predefinidos (set points): el calentador de ambiente cuando la temperatura descendía por debajo de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, y el humidificador cuando la humedad relativa bajaba de $65\% \pm 5\%$. En el área de fructificación, la electroválvula se activaba al detectarse una humedad relativa de 85%

$\pm 5\%$. Finalmente, se configuró un sistema de alertas automáticas vía correo electrónico, que notificaba al responsable del cultivo ante cualquier desviación de los parámetros establecidos.

A continuación, se presenta una síntesis comparativa de los dispositivos empleados en cada etapa del sistema de monitoreo IoT, con el propósito de evidenciar la progresiva incorporación de tecnologías más eficientes, precisas y automatizadas. La Tabla 2 detalla los sensores, sistemas de control y actuación, sus especificaciones técnicas y los costos asociados, lo que permite analizar la evolución del sistema desde soluciones manuales hacia configuraciones automatizadas con mayor capacidad de recolección y respuesta en tiempo real.

Tabla 2. Comparación de dispositivos utilizados en cada etapa del sistema de monitoreo IoT.

Etapa	Dispositivos de sensado	Dispositivos de control y actuación	Especificaciones técnicas
Etapa 1	Termohigrómetro de sonda		- Termohigrómetro con pantalla LCD y sonda externa para medir temperatura y humedad.: Rango $0\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$; HR $10\text{--}90\%$; Precisión $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $\pm 5\%$ HR
		- Calentador de ambiente (manual)	- Calentador casero: 110V, 650W, con termostato mecánico
		- Válvula de aspersión (manual)	Válvula de bola de PVC utilizada para controlar el flujo de agua en sistemas de riego.
Etapa 2	Termohigrómetro digital (conexión móvil)		Sensor inalámbrico de temperatura y humedad compatible con dispositivos móviles: Comunicación Bluetooth o WiFi
		- Calentador de ambiente (manual)	- Calentador casero: 110V, 650W
		- Válvula de aspersión nebulizadora (manual)	- Válvula diseñada para sistemas de nebulización, utilizada en aplicaciones agrícolas: presión 2–5 bar, conexión $\frac{1}{2}$ "

Etapas	Dispositivos de sensado	Dispositivos de control y actuación	Especificaciones técnicas
Etapas 3	Termohigrómetro digital (conexión móvil)	- Smart switch WiFi	- Smart switch WiFi: 10A máx, 100–240V AC, compatible con Alexa/Google Home, control remoto vía app, protocolo MQTT o HTTP
		- Calentador de ambiente	- Calentador: 110V y 650 W, controlado mediante switch
		- Electroválvula (aspersión)	- Electroválvula solenoide 12V DC: Normalmente cerrada, presión operativa 0.2–0.8 MPa, flujo 2–5 L/min, conexión 1/2"
Etapas 4	Sensor DHT11 (T° y HR)		Sensor digital de temperatura y humedad ampliamente utilizado en proyectos de electrónica: DHT11: T °0–100 °C, ±2 °C; HR 20–90%, ±5%
		- Arduino WiFi R1 D32	- Arduino WiFi R1 D32 (ESP32): Soporte WiFi, 3.3V, múltiples GPIO, memoria 4MB
		- Relé doble canal 5V	- Relé doble 5V: Capacidad 10A 110V AC o 10A 30V DC, optoacoplado
		- Calentador de ambiente	- Calentador: 110V y 650 W, controlado automáticamente por relé
		- Humidificador casero	- Humidificador casero: Flujo aprox. 300 ml/h, depósito 500 mL, controlado automáticamente por relé
		- Electroválvula	- Electroválvula 12V DC: igual a etapa 3, controlada automáticamente por relé

Variables de respuesta

Número de días que tomó en inocular todo el sustrato, que corresponde al número de días entre la inoculación y colonización completa de la bolsa.

$$DI = \text{número de días en colonizar el sustrato}$$

Eficiencia biológica, relación entre el peso total de hongos cosechados y el peso seco del sustrato, se toma cada una de las cosechas y la suma de las tres cosechas:

$$EB = \frac{\text{Peso hongo fresco (g)}}{\text{Peso sustrato base seca (g)}} * 100$$

Análisis estadístico

Los datos se procesaron y analizaron con los programas Microsoft Excel y Minitab, para establecer diferencias. En las variables que mostraron diferencias estadísticamente significativas, se realizaron comparaciones múltiples con el procedimiento de Tukey con un nivel de confianza del 95%.

Resultados

Número de días en incubación

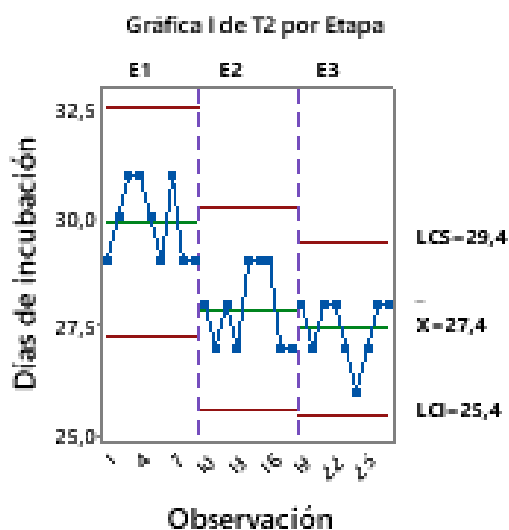
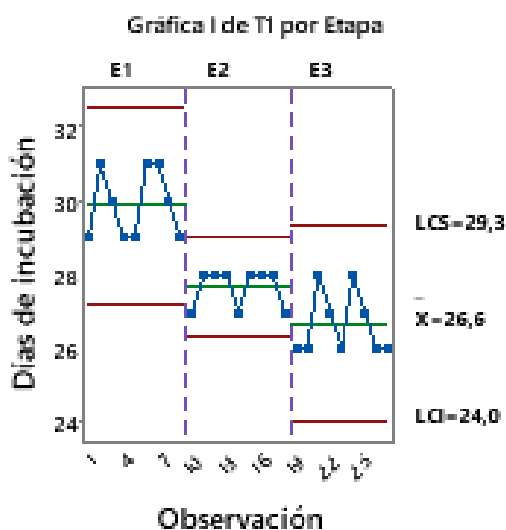
Durante las etapas 1 a 3, se evidenció que el tratamiento con mayor eficiencia en la

colonización del sustrato fue la mezcla compuesta por 20 % de KK, 20 % de CA, 20 % de RM, 20 % de ST, 20 % de AS y 1 % de carbonato de calcio, inoculada con un 8 % de semilla (SE) para T4 y un 9 % para T5. En la Etapa 3, estos tratamientos alcanzaron los mejores periodos medios de incubación: 25,7 días para T4 y 26,0 días para T5. En contraste, los tratamientos T1, T2, T3 y T6 presentaron tiempos medios de incubación más prolongados, entre 26,6 y 27,4 días, con una mayor variabilidad en los datos, cuyos valores oscilaron entre 24 y 31 días.

Por su parte, los tratamientos T4 y T5 mostraron un comportamiento más estable. La variabilidad observada para T4 se situó en-

tre 22,4 y 29,1 días, mientras que T5 presentó el rango más estrecho y consistente, con valores entre 25,0 y 26,9 días, Figura 1.

Con base en estos resultados, se seleccionó el tratamiento T5 como el más favorable para la implementación en la Etapa 4, correspondiente al sistema de monitoreo completamente automatizado. Al aplicar este tratamiento bajo condiciones controladas, se obtuvo un desempeño aún más preciso, con un tiempo medio de incubación de 26,78 días y una desviación estándar de 1,69 días, lo cual confirma su estabilidad y consistencia en el nuevo entorno tecnológico se logró demostrar estadísticamente que se puede tener un tiempo inferior a 28 días.



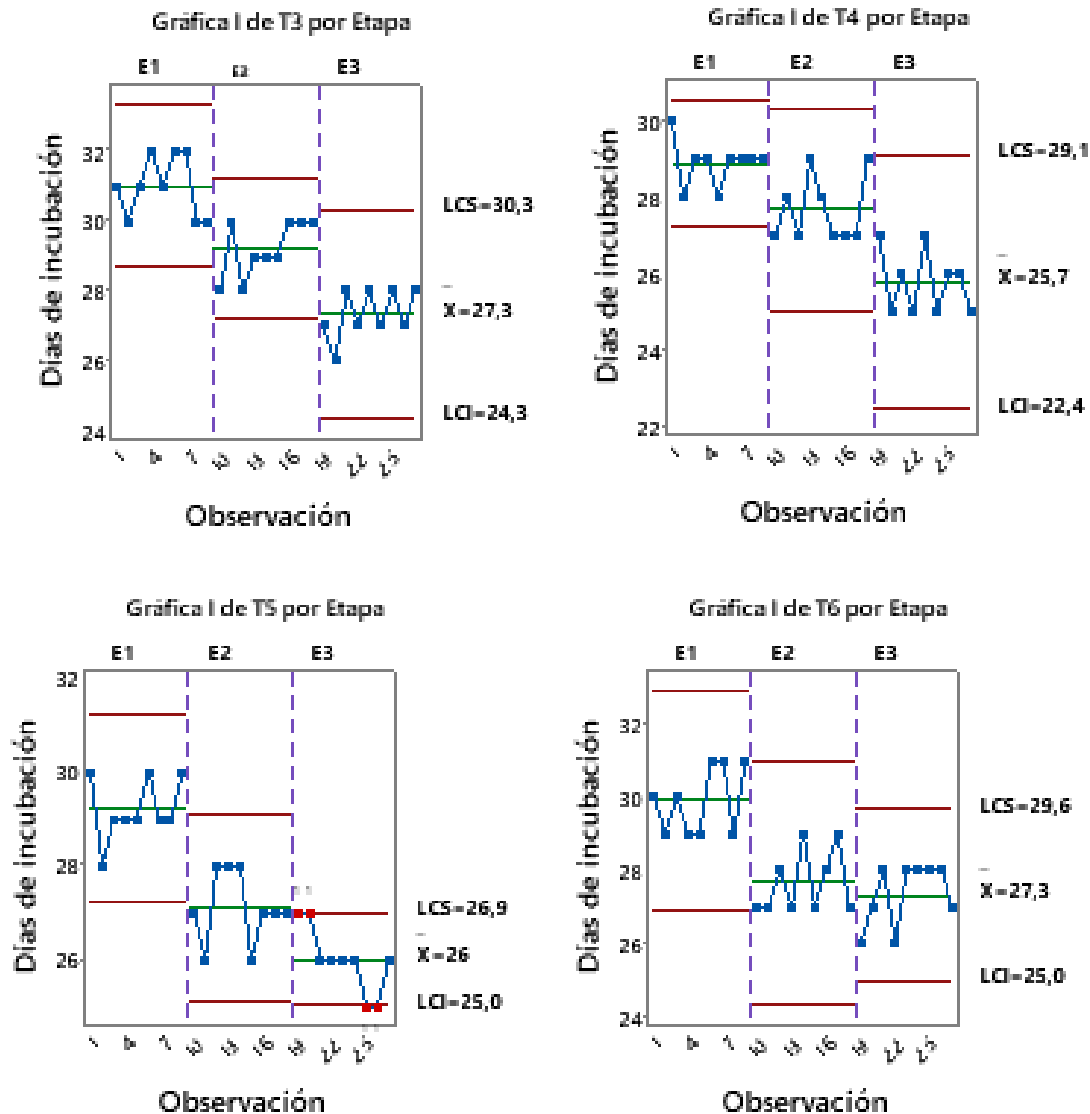


Figura 1. Comparativo de los días de incubación del hongo (*P. ostreatus*) por etapa y tratamiento

La Figura 1, muestra seis gráficas de control tipo I (individual) para los tratamientos T1 a T6, excluyendo el grupo control (T7), cada una segmentada por etapas experimentales (1 a 3). En estas gráficas se visualiza el comportamiento de los días de incubación (DI) a lo largo del tiempo para cada tratamiento, junto con la media y los límites de control (LSC y LIC), lo cual permite evaluar tanto la estabilidad como

la tendencia del proceso bajo diferentes condiciones de tecnificación del sistema de monitoreo y control ambiental.

Se evidenció que de manera sistemática, a medida que se avanzaba en las etapas 1 a 3 del experimento, los días de incubación fueron estabilizando y reduciendo, especialmente en tratamientos como T4 y T5. En la Etapa 1, donde el control de las

variables temperatura y humedad fue manual y limitado, se observó una mayor variabilidad y una tendencia al alza en varios tratamientos, como T3 y T6.

En contraste, en la Etapa 3, donde se implementó el control remoto a través de dispositivos inteligentes con respuesta en tiempo real (*smart switches*), el comportamiento de los días de incubación fue más estable,

con menor variación respecto de la media, con una importante y sostenida reducción, particularmente, los tratamientos T4 y T5. Esta mejora puede atribuirse directamente a la implementación del sistema digital de monitoreo y control ambiental, que permitió ajustes automáticos y oportunos de temperatura y humedad, factores críticos para la germinación del hongo.

Tabla 3. Número de días de incubación del hongo (*P. ostreatus*) en las diferentes etapas.

Etapa	Experimento	Réplica	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Etapa 1	1	1	29	29	31	30	30	30	30
Etapa 1	2	1	31	30	30	28	28	29	30
Etapa 1	3	1	30	31	31	29	29	30	29
Etapa 1	1	2	29	31	32	29	29	29	30
Etapa 1	2	2	29	30	31	28	29	29	29
Etapa 1	3	2	31	29	32	29	30	31	30
Etapa 1	1	3	31	31	32	29	29	31	29
Etapa 1	2	3	30	29	30	29	29	29	31
Etapa 1	3	3	29	29	30	29	30	31	31
Etapa 2	1	1	27	28	28	27	27	27	29
Etapa 2	2	1	28	27	30	28	26	27	28
Etapa 2	3	1	28	28	28	27	28	28	28
Etapa 2	1	2	28	27	29	29	28	27	29
Etapa 2	2	2	27	29	29	28	28	29	27
Etapa 2	3	2	28	29	29	27	26	27	29
Etapa 2	1	3	28	29	30	27	27	28	28
Etapa 2	2	3	28	27	30	27	27	29	27
Etapa 2	3	3	27	27	30	29	27	27	29
Etapa 3	1	1	26	28	27	27	27	26	27
Etapa 3	2	1	26	27	26	25	27	27	27
Etapa 3	3	1	28	28	28	26	26	28	27
Etapa 3	1	2	27	28	27	25	26	26	26
Etapa 3	2	2	26	27	28	27	26	28	27
Etapa 3	3	2	28	26	27	25	26	28	28

Etapa	Experimento	Réplica	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Etapa 3	1	3	27	27	28	26	25	28	26
Etapa 3	2	3	26	28	27	26	25	28	27
Etapa 3	3	3	26	28	28	25	26	27	26
		Mean	28,07	28,41	29,19	27,44	27,44	28,30	28,30
		Stdeviation	1,57	1,37	1,71	1,50	1,53	1,44	1,49
		Max	31	31	32	30	30	31	31
		Min	26	26	26	25	25	26	26

Hallazgos clave por tratamiento

T1 y T2: Presentan una clara disminución progresiva en la media de DI entre las etapas. Para T1, la media desciende desde 29,9 días en Etapa 1 hasta 26,6 días en Etapa 3, mientras que T2 pasa de 29,9 a 27,4 días. Esta reducción sistemática de los DI entre la Etapa 1 versus Etapa 3 en estos dos tratamientos, podría ser indicio de que los sustratos usados en estos tratamientos generan un entorno cada vez más favorable y de que hay un aprendizaje experimental en la gestión de estos lotes.

T3: Exhibe la media de DI más alta de todo el estudio, con una media de 31 días en Etapa 1, lo cual lo posiciona como el tratamiento menos eficiente para la germinación inicial. No obstante, esta media cae a 27,3 días en Etapa 3, manteniéndose relativamente elevada. Esto sugiere que T3 podría involucrar un sustrato menos adecuado en comparación con los demás.

T4 y T5: Son los tratamientos con las medias de DI más bajas. En la Etapa 1, el trata-

miento 4 (T4) estaba en una media de 28,8 días y se reduce en Etapa 3 a una media de 25,7 días. Mientras que con el tratamiento 5 (T5) la Etapa 1 tuvo una media de 29,2 días y en Etapa 3 se reduce a un valor medio de 26 días. Este hallazgo es relevante ya que demuestra el potencial de estos sustratos para acelerar significativamente la incubación, especialmente en condiciones optimizadas.

T6: Aunque también muestra una reducción, su comportamiento es más variable. T6 mantiene una media de 29,9 días en Etapa 1 y llega a 27,3 días en Etapa 3. Su desempeño sugiere una respuesta moderadamente positiva, aunque con menores resultados que los tratamientos T4 y T5.

Grupo de control T7: El tratamiento 7 que es el grupo de control no se muestra en la Figura 1, pero de conforme los datos experimentales dispuestos en la Tabla 3, este tratamiento alcanzó una media de 29,9 (Etapa 1) y se redujo hasta a 26,8 días en Etapa 3.

Los resultados obtenidos en la investigación muestran que el tratamiento T5, compuesto por una mezcla balanceada de residuos lignocelulósicos (20 % KK + 20 % CA + 20 % RM + 20 % ST + 20 % AS + 1 % CaCO_2 y 8–9 % SE), logró la mejor colonización del micelio de *Pleurotus ostreatus*, con un período de incubación promedio de 26 días con un proceso estable que permite estimar que su variación estará en el rango de entre 25 días a 26,9 días. Estos resultados permiten avanzar a la Etapa 4 con un proceso totalmente automatizado y controlado, empleando un tratamiento que experimentalmente es considerado el de mejor prospecto (T5).

Número de Días de Incubación en Etapa 4

Con el fin de comprobar si el tratamiento aplicado en la Etapa 4 del experimento jun-

to con la automatización total del control del proceso, logra reducir significativamente el tiempo de incubación del *Pleurotus ostreatus*, se realizó una *prueba t* de una muestra sobre 54 observaciones. Se contrastó la hipótesis de que la media de días de incubación es menor al umbral de 28 días.

Como punto de partida se analizó la estabilidad del proceso mediante una gráfica de control de tipo I (gráfica de valores individuales) con el propósito de visualizar si el comportamiento del sistema ha sido constante en el tiempo o si, por el contrario, presenta señales de inestabilidad que puedan distorsionar los resultados estadísticos.

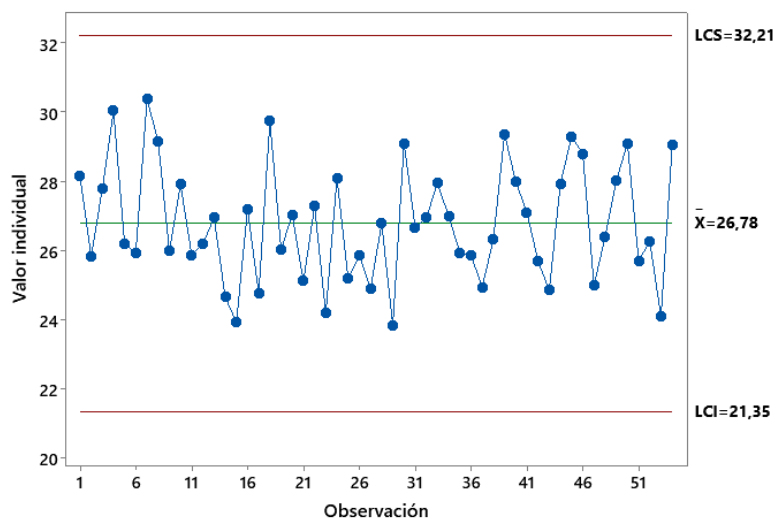


Figura 2. Comportamiento en los días de incubación en Etapa 4.

En la Figura 2 se representan las 54 observaciones correspondientes a las bolsas evaluadas en el experimento de la Etapa 4 (todo el sistema automatizado), cada una indicando el número de días requeridos hasta la aparición del primordio. Se tiene un proceso estable sin patrones aberrantes, secuencias inusuales, sin comportamientos sistemáticos ni puntos fuera de los límites control, lo que permite indicar que el tiempo medio de días de incubación (línea central) es de 26,78 días con una variación que puede estar entre 21,35 y 32,21 días.

La estabilidad del proceso es fundamental, ya que indica que la variación observada en los datos responde al comportamiento inherente del sistema y no a la presencia de factores externos o alteraciones no controladas, es decir, causas especiales de variación. Esta confirmación permite avanzar con confianza hacia el uso de herramientas estadísticas e inferenciales como la prueba

t y el análisis gráfico comparativo, con la garantía de que el proceso se encuentra bajo control estadístico, condición necesaria para la validez de estos métodos.

Consecuentemente, se procedió a evaluar si el tiempo promedio de incubación era inferior al umbral de referencia de 28 días; la variable tiempo de aparición de los primordios, representa un fenómeno biológico continuo: el desarrollo del primordio/micelio, esto justifica su análisis mediante métodos paramétricos, como la prueba t de una muestra.

Previamente, se verificaron los supuestos estadísticos requeridos con ayuda del software minitab, se verificó la normalidad de los datos mediante la prueba de Anderson Darling, especialmente recomendada para muestras pequeñas o medianas como esta la cual se presenta en la Figura 3.

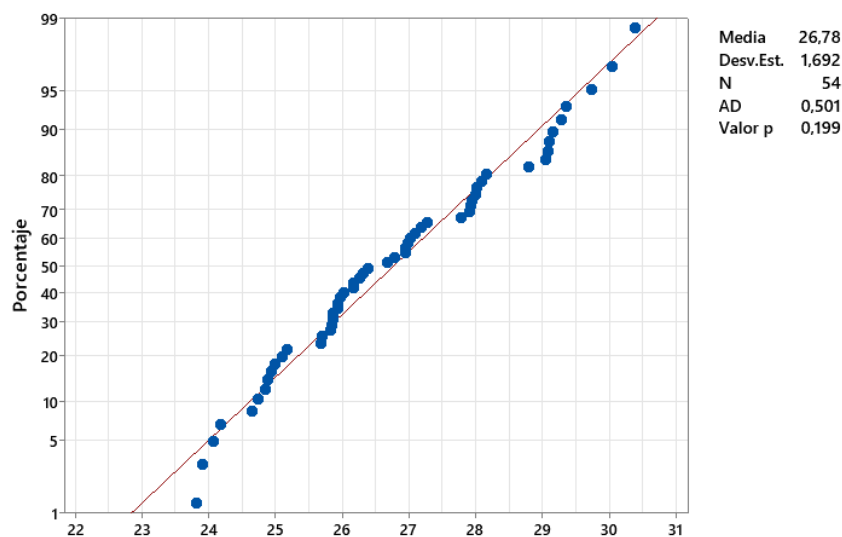


Figura 3. Gráfico de normalidad Días de incubación Etapa 4.

Bajo este marco se valida estadísticamente si la automatización permite alcanzar un tiempo de incubación media por debajo de 28 días por medio de una prueba t de una muestra, con la hipótesis nula $H_0: \mu = 28$ días

y la hipótesis alternativa unilateral $H_1: \mu < 28$ días, donde μ es la media poblacional de Días de Incubación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados prueba de hipótesis para Días de Incubación Etapa 4 < 28 días.

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para μ	Valor T	Valor p
54	26,78 días	1,692	0,230	27,166	-5,30	0,000

Los resultados indican una media observada de 26,78 días (Desviación Estándar = 1,692 días), con un límite superior del intervalo del 95% de confianza para días de incubación en 27,166 días, el valor p (una cola) fue 0.000, menor que el nivel de significancia alfa de 0,05 por lo que se rechaza la

hipótesis nula y se concluye que la media de los días de incubación es estadísticamente inferior a 28 días, esta conclusión se refuerza gráficamente mediante el histograma, en el que la media observada se encuentra claramente a la izquierda del valor hipotético, Figura 4.

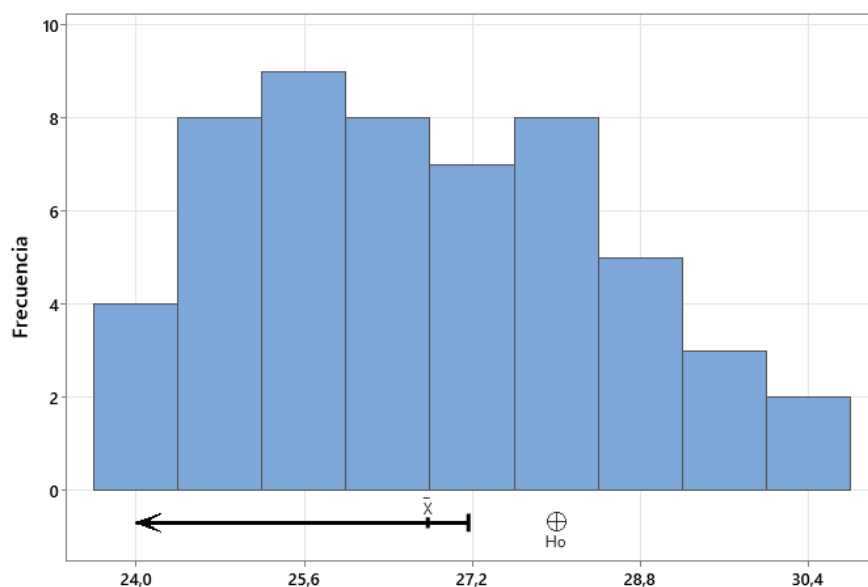


Figura 4. Contraste Hipótesis Nula, intervalo de confianza para la media e Histograma de Días de Incubación en Etapa 4.

La forma del histograma es aproximadamente simétrico y unimodal, lo que refuerza visualmente la idea de que los datos se comportan como una distribución normal (lo cual fue probado estadísticamente), la flecha hacia la izquierda representa el intervalo de confianza del 95% para la media de días de incubación observados, mientras que el símbolo de la hipótesis nula (H_0) marca la media hipotética de 28 días. La integración de estos tres elementos proporciona una visual clara de que el valor de referencia queda por fuera del intervalo de confianza, lo que refuerza el planteamiento de que la media real podría ser significativamente menor.

Una gráfica complementaria con la dispersión de los valores individuales recolectados en el experimento se muestra en la Figura 5, con los datos observados en el experimento a lo largo de la escala de días. Cada punto representa una observación individual. La línea con la " \bar{X} " marca la media muestral (26,78 días) y su intervalo de confianza, mientras que el símbolo circular marca la hipótesis nula. Nuevamente, se nota que la media hipotética no cae dentro del intervalo, lo que visualmente respalda el resultado de la prueba t.

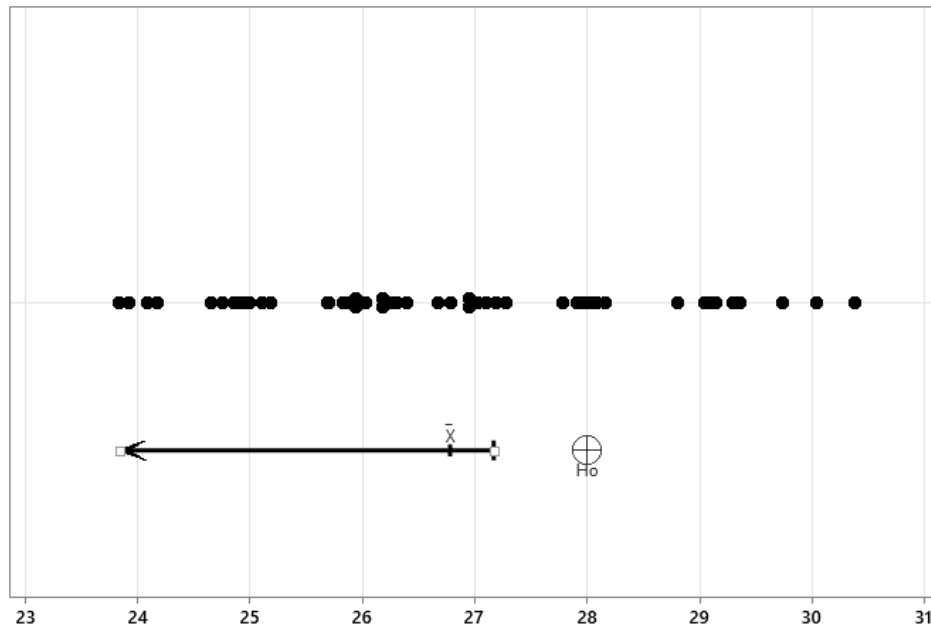


Figura 5. Contraste Hipótesis Nula, intervalo de confianza para la media y valores individuales de Días de Incubación en Etapa 4.

Los resultados combinados del histograma, los gráficos de valores individuales, el resumen estadístico y la *prueba t* permiten afirmar con confianza que el proceso de incubación bajo estudio presenta una duración promedio significativamente menor a 28 días, la distribución de los datos es suficientemente cercana a la normalidad, lo que valida el uso de métodos paramétricos. La media estimada de 26,78 días de incubación se encuentra respaldada tanto por el intervalo de confianza como por la evidencia gráfica y numérica. Estos hallazgos confirman que el tratamiento aplicado fue efectivo para reducir el tiempo de incubación, lo cual representa un avance técnico con implicaciones prácticas positivas para el cultivo.

Eficiencia biológica

La eficiencia biológica (EB) se estableció como una variable de respuesta clave para evaluar el desempeño productivo del cultivo de *Pleurotus ostreatus* bajo diferentes condiciones de tecnificación. A lo largo de esta sección, se presentan y ana-

lizan los resultados obtenidos en las cuatro etapas experimentales, comparando el comportamiento de los distintos tratamientos implementados. Para ello, se aplicaron herramientas estadísticas rigurosas que permitieron interpretar con solidez los cambios en la eficiencia del cultivo, en los diferentes escenarios de control diseñados para las Etapas del experimento. El análisis parte de la validación de supuestos estadísticos fundamentales, continúa con pruebas inferenciales y análisis gráficos, y culmina con evidencias contundentes sobre el impacto de la automatización en el rendimiento o Eficiencia biológica pueda alcanzar un umbral de por lo menos el 50%.

Los resultados obtenidos de la eficiencia biológica para el experimento en las ETAPAS 1,2 y 3 se muestran en la Tabla 5, los tratamientos con mayor eficiencia biológica (%) para el total de las cosechas fueron los tratamientos cuatro, cinco y seis (T4, T5 y T6), presentando mayor eficiencia el tratamiento cinco con una eficiencia biológica del 43,66%.

Tabla 5. Eficiencia biológica (%) del hongo (*P. ostreatus*) (cosechas 1, 2, 3) para los siete tratamientos.

Tratamiento	EB _{prom-E1}	EB _{prom-E2}	EB _{prom-E3}
T1	29,37	33,73	37,13
T2	28,32	32,77	39,88
T3	28,56	33,20	38,82
T4	30,22	34,08	41,30
T5	28,57	36,04	43,66
T6	28,42	35,76	41,16
T7	29,33	33,62	40,83

La eficiencia biológica se calculó a partir de la relación entre el peso del hongo fresco obtenido y el peso del sustrato seco utilizado, de acuerdo con la fórmula previamente presentada. Ambas son variables continuas, por lo que el análisis estadístico inició con la verificación de la normalidad de los datos para cada una de las tres etapas experi-

mentales. Para ello, se aplicó la prueba de Anderson-Darling con un nivel de confianza del 95 %. Los resultados indican que en las tres etapas, los valores de p fueron superiores al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0,05$), lo que permite asumir la normalidad de las distribuciones. Esta validación se presenta en la Figura 6.

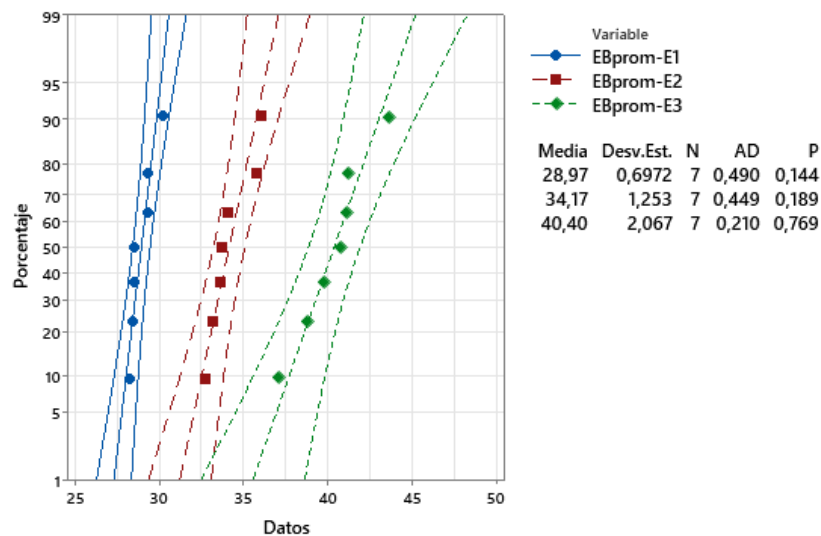


Figura 6. Gráficos de normalidad y test de normalidad para Eficiencia biológica por etapa.

Una vez confirmada la normalidad de los datos, se procedió a construir una gráfica de intervalos de confianza para la media de la eficiencia biológica, Figura 7. Con el fin de explorar visualmente las diferencias entre las etapas 1, 2 y 3. Los resultados evidenciaron que no existen traslapes entre los intervalos, y que la Etapa 3 presenta una diferencia claramente destacada respecto a las demás, independientemente del tratamiento utilizado.

Esta primera aproximación sugiere un efecto positivo atribuible al sistema de control

y monitoreo implementado en esa etapa. Cabe destacar que, al igual que en el análisis de los días de incubación, este enfoque busca identificar con rigor estadístico el tratamiento más eficiente para ser aplicado en la Etapa 4, donde se evalúa el sistema de automatización total. Para fortalecer esta observación preliminar y aportar mayor solidez al estudio, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), cuyos resultados se presentan en el siguiente apartado.

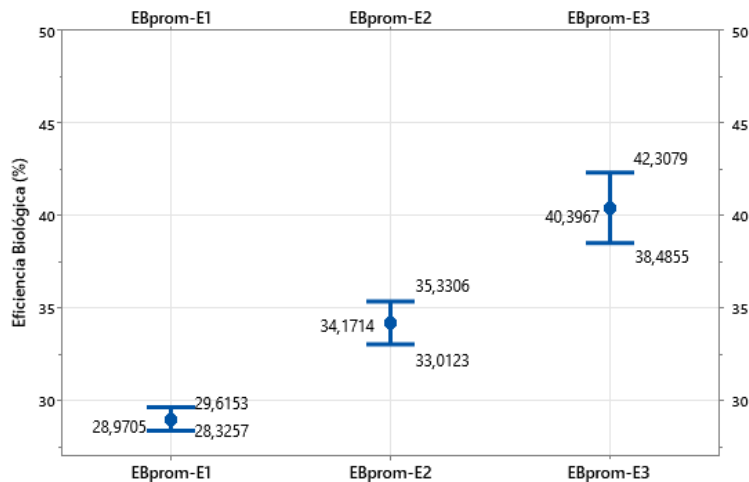


Figura 7. Gráfica de intervalos para la media de la Eficiencia Biológica por etapa al 95% de confianza

Antes de aplicar el análisis ANOVA, es fundamental asegurarse de que se cumplan sus supuestos básicos: normalidad y homogeneidad de varianzas. La normalidad ya fue comprobada estadísticamente, por tanto, se realizó una prueba de igualdad de varianzas con un nivel de confianza del 95%, cuyos resultados indicaron que no hay diferencias significativas entre las varianzas de la eficiencia biológica en las etapas E1,

E2 y E3. Esto confirma que el supuesto de homocedasticidad se cumple, lo que valida el uso del ANOVA para continuar con la comparación de las medias. Al aplicar el test ANOVA, se evidenció que existen diferencias estadísticamente significativas en la eficiencia biológica entre las tres etapas analizadas. Estos hallazgos se ilustran en la Figura 8.

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	458,18	229,088	108,62	0,000
Error	18	37,96	2,109		
Total	20	496,14			

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
1,45230	92,35%	91,50%	89,58%

Figura 8. Resultados del test ANOVA Eficiencia Biológica.

El análisis de varianza (ANOVA) evidencia diferencias estadísticamente significativas en la Eficiencia Biológica (EB) del cultivo del hongo *Pleurotus ostreatus* entre las tres etapas evaluadas de automatización (E1: sin automatización, E2: control semiautomatizado de temperatura y humedad relativa, y E3: automatización total del sistema). El estadístico F obtenido ($F = 108,62$) indica que la variación entre grupos es considerablemente mayor que la variación dentro de los grupos, lo cual sugiere diferencias claras entre las medias de EB en las distintas etapas del experimento.

El valor de significancia asociado ($p = 0,000$) permite rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%, concluyendo que al menos una de las etapas presenta un nivel de eficiencia biológica significativamente distinto respecto de las otras. Este hallazgo es consistente con la hipótesis de que la automatización progresiva del cultivo influye de forma significativa en su desempeño biológico.

En cuanto a la calidad del ajuste del modelo, la desviación estándar residual ($S = 1,4523$) representa el promedio de las diferencias entre los valores observados y los valores estimados por el modelo para cada etapa. Dado que los valores de EB en este estudio fluctúan entre aproximadamente 28,3% y 42,3%, un error estándar de $\pm 1,45$ resulta bajo, lo cual refuerza la confiabilidad del modelo y la precisión de las estimaciones.

Respecto al coeficiente de determinación, el R^2 alcanza un valor del 92,35%, lo que indica que más del 92% de la variabilidad total en la eficiencia biológica se explica por las diferencias entre las etapas de automatización. Este nivel se considera excelente en estudios experimentales, especialmente cuando supera el umbral del 80%, ya que evidencia un modelo explicativo sólido.

Adicionalmente, el R^2 ajustado (91,50%), que compensa el número de grados de libertad y es menos susceptible al sesgo por inclusión de variables irrelevantes, confirma que el modelo no está sobreajustado y que el efecto de las etapas es genuino. Por su parte, el R^2 predicho (89,58%) evalúa la capacidad del modelo para generalizar y predecir resultados en nuevos datos. Al ser cercano al R^2 ajustado y superior al 80%, este valor demuestra que el modelo es robusto y ofrece una buena capacidad de predicción, lo cual resulta particularmente útil si se desea extrapolar estos resultados a otros sistemas de cultivo bajo condiciones similares.

En conjunto, los indicadores del modelo ANOVA permiten concluir con solidez estadística que el grado de automatización tiene un efecto significativo sobre la eficiencia biológica del cultivo de *Pleurotus ostreatus*, y que el modelo desarrollado es adecuado tanto para explicar como para predecir el comportamiento de la variable de interés en distintas etapas de tecnificación del proceso.

Tras confirmarse diferencias estadísticamente significativas entre etapas mediante ANOVA, se aplicó el método de comparación múltiple de Tukey con un nivel

de confianza del 95% (utilizando Minitab) para identificar con precisión cuáles etapas difieren entre sí en términos de eficiencia biológica (EB).

Tabla 6. Comparaciones en parejas de Tukey. **Fuente:** Esta investigación (Minitab)

Factor	N	Media	Agrupación		
EBprom-E3	7	40,397	A		
EBprom-E2	7	34,171		B	
EBprom-E1	7	28,970			C

La Tabla 6 presenta los resultados del análisis *post hoc* con la prueba de Tukey, aplicado tras confirmar mediante ANOVA que existen diferencias significativas en la eficiencia biológica entre las etapas evaluadas. Como se observa, las medias de eficiencia biológica se agrupan en tres niveles claramente diferenciados: la Etapa 3 (E3) alcanza la mayor eficiencia promedio (40,397%) y se le asigna la letra A, la Etapa 2 (E2) muestra una eficiencia intermedia (34,171%) con la letra B, y la Etapa 1 (E1) presenta la eficiencia más baja (28,970%), representada por la letra C.

La asignación de letras distintas a cada etapa indica que las diferencias entre ellas son estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95%. Es decir, no existe traslape en los intervalos de confianza de las medias, lo cual refuerza la solidez de los hallazgos. Este resultado permite afirmar con evidencia que el desempeño del sistema mejora progresivamente a medida que se avanza en las etapas, siendo la Etapa 3 la que ofrece el mayor impacto positivo en la

eficiencia biológica del cultivo. Este hallazgo resulta clave para la toma de decisiones en torno a la implementación del tratamiento más eficaz en la etapa 4, correspondiente a la automatización total del sistema.

Este resultado se refuerza con la visualización gráfica de los intervalos de confianza simultáneos generados por la prueba de Tukey. En la (Figura 9) se ilustran las comparaciones por pares de medias entre etapas (E2–E1, E3–E1 y E3–E2), y en todos los casos los intervalos no incluyen el valor cero. Esta ausencia de traslape con el cero indica que las diferencias encontradas no son producto del azar, sino que reflejan efectos reales y consistentes generados por las condiciones específicas de cada etapa experimental. Así, la gráfica no solo confirma lo reportado en la Tabla 6, sino que ofrece una representación visual que facilita la interpretación del impacto progresivo del sistema de monitoreo sobre la eficiencia biológica. efecto real entre las condiciones experimentales de cada etapa.

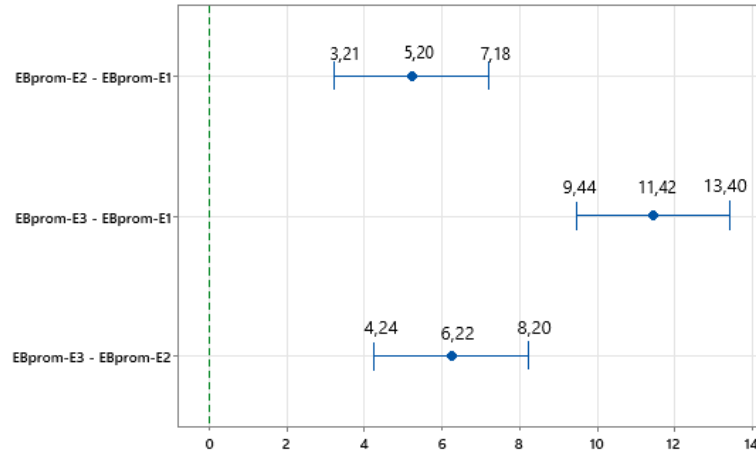


Figura 9. Intervalos de confianza simultáneos del 95% de Tukey. Fuente: Esta investigación (uso software Minitab)

Finalmente, para asegurar la validez del modelo ANOVA y la confiabilidad de sus conclusiones, se evaluaron los residuos, que representan las diferencias entre los valores observados y los valores estimados por el modelo. Este análisis es esencial

para verificar que se cumplan los supuestos estadísticos básicos: normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas. En la Figura 10 se presentan los gráficos correspondientes.

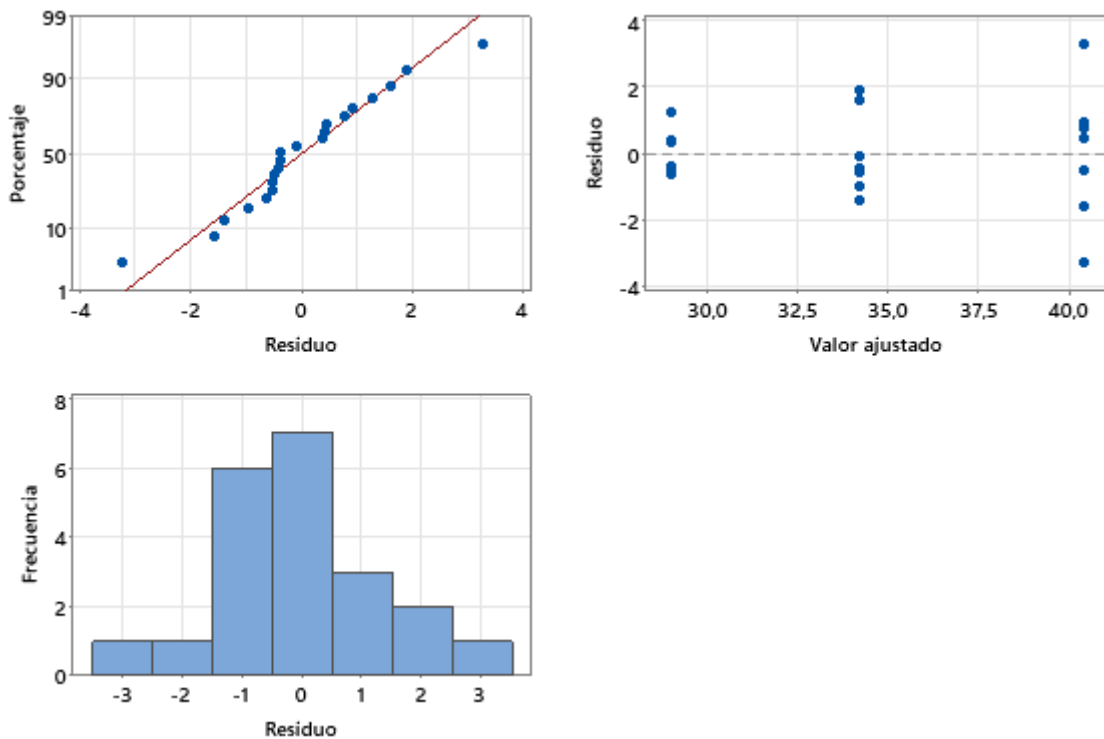


Figura 10. Gráficos de residuos del modelo ANOVA.

En la Figura 10, la gráfica de probabilidad normal (superior izquierda) muestra una alineación adecuada de los residuos con la línea de referencia, lo que respalda el cumplimiento del supuesto de normalidad. A su vez, el histograma (inferior izquierda) refleja una distribución simétrica similar a una curva normal, lo cual refuerza la validez del modelo desde la perspectiva de la distribución de los errores. Finalmente, la gráfica de residuos versus valores ajustados (superior derecha) evidencia un patrón completamente aleatorio, sin tendencias ni formas estructuradas, lo que sugiere que el supuesto de homocedasticidad también se cumple.

Si bien los resultados obtenidos en la etapa 3 evidencian una mejora sustancial en la eficiencia biológica del cultivo, es fundamental precisar que esta fase no corresponde a un nivel de automatización total, teniendo en cuenta que el sistema implementado combinaba sensores digitales con control remoto a través de *smart switches* activados manualmente desde un dispositivo móvil, este grado de tecnificación representó un avance significativo respecto a las etapas 1 y 2, lo cual formaba parte de un proceso progresivo de implementación tecnológica, donde aún se requería cierto grado de intervención manual para mantener las condiciones ambientales que el cultivo requería.

Tras validar estadísticamente las diferencias en la eficiencia biológica entre las tres

primeras etapas y comprobar que el tratamiento 5 (T5) ofrecía el mejor desempeño, se dio paso a una cuarta etapa, concebida para poner a prueba ese tratamiento bajo condiciones de automatización total. Esta fase representó un punto de consolidación tecnológica en el sistema de cultivo, incorporando herramientas que ya fueron descritas detalladamente en apartados anteriores. El objetivo fue evaluar el comportamiento del cultivo en un entorno completamente controlado, sin necesidad de intervención operativa constante.

A continuación, se presenta el análisis estadístico correspondiente a la Etapa 4, centrado en evaluar el comportamiento de la eficiencia biológica bajo condiciones de automatización total del proceso.

Eficiencia biológica en Etapa 4

La efectividad del sistema de automatización total implementado en la etapa 4 del cultivo, se evaluó analizando la variable eficiencia biológica (EB) a partir de una muestra de 54 observaciones correspondientes al tratamiento T5, previamente identificado como el más eficiente en las etapas 1 a 3.

Normalidad y estabilidad del proceso

Siguiendo en rigor el procedimiento estadístico requerido, el primer paso consistió en verificar el supuesto de normalidad, indispensable para aplicar pruebas paramétricas como la prueba t. Mediante la prueba de

Anderson-Darling se obtuvo un valor-p de 0,691, presentada en la Figura 11, lo que indica que los datos no presentan evidencia de

desviación significativa respecto a una distribución normal ($\alpha = 0,05$), lo cual respaldó la validez de los análisis subsiguientes.

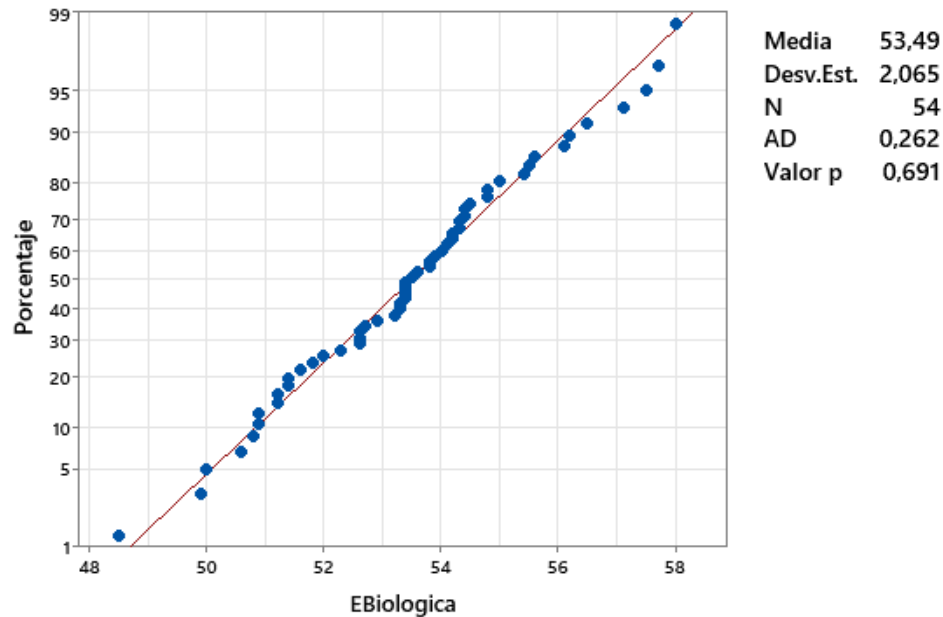


Figura 11. Prueba de normalidad Anderson Darling para Eficiencia Biológica en Etapa 4.

En el marco de la Etapa 4, se construyó una gráfica de control tipo I, Figura 12, con el fin de verificar la estabilidad del proceso en términos de eficiencia biológica. Esta herramienta permite monitorear cómo se comportan los valores individuales frente a los límites estadísticos de control. En la gráfica se observa una media general de 53,49%, con todos los puntos distribuidos dentro del Límite de Control Inferior (LCI) de 48,19% y el Límite de Control Superior (LCS) de 58,79%. A lo largo de las 54 observaciones representadas, no se identifican puntos fuera de los límites ni patrones que sugieran comportamiento anómalo, como tendencias crecientes, secuencias cíclicas o

agrupamientos inusuales. Por el contrario, la variabilidad se mantiene dentro de los márgenes esperados y de forma aleatoria, lo que indica que el proceso se encuentra en estado de control estadístico.

Este resultado no solo reafirma la efectividad del sistema automatizado implementado en esta fase, sino que además brinda confianza en la consistencia y previsibilidad del rendimiento del cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Alcanzar este nivel de estabilidad es un hito clave, ya que permite sostener la mejora en el tiempo y facilita la toma de decisiones basadas en datos confiables.

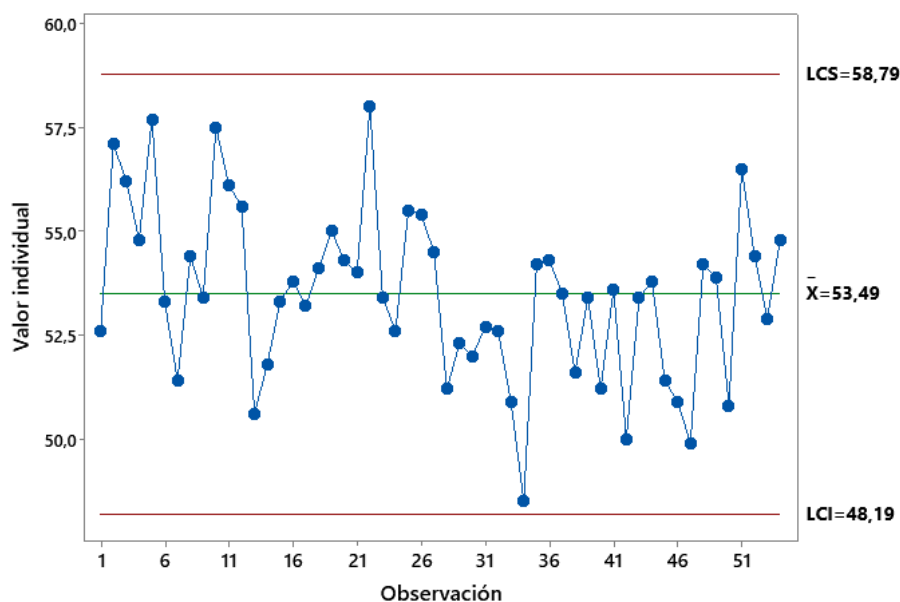


Figura 12. Gráfica I de Eficiencia Biológica en Etapa 4.

Prueba de hipótesis: ¿La eficiencia biológica en Etapa 4 supera el 50%?

Para validar estadísticamente si la automatización permite superar el umbral del 50% en Eficiencia biológica, se aplicó una prueba t de una muestra, con la hipótesis

nula $H_0: \mu = 50\%$ y la alternativa unilateral $H_1: \mu > 50\%$, donde μ es la media poblacional de Eficiencia Biológica. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados prueba de hipótesis para Eficiencia Biológica Etapa 4 >50%.

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
54	53,491	2,065	0,281	53,020	12,42	0,000

Dado que el valor-p es inferior al nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la eficiencia biológica en la etapa 4 es estadísticamente superior al 50%, con un 95% de confianza. Este resultado proporciona evidencia sólida de que el sistema de monitoreo y control

ambiental completamente automatizado tiene un impacto positivo y significativo sobre el rendimiento del cultivo.

El contraste de hipótesis también fue representado gráficamente mediante un histograma, un gráfico de valores individuales

y un box plot, en todos los casos se visualiza claramente cómo la media observada (53,49%) y su intervalo de confianza se en-

cuentran desplazados hacia la derecha del valor hipotético de 50%.

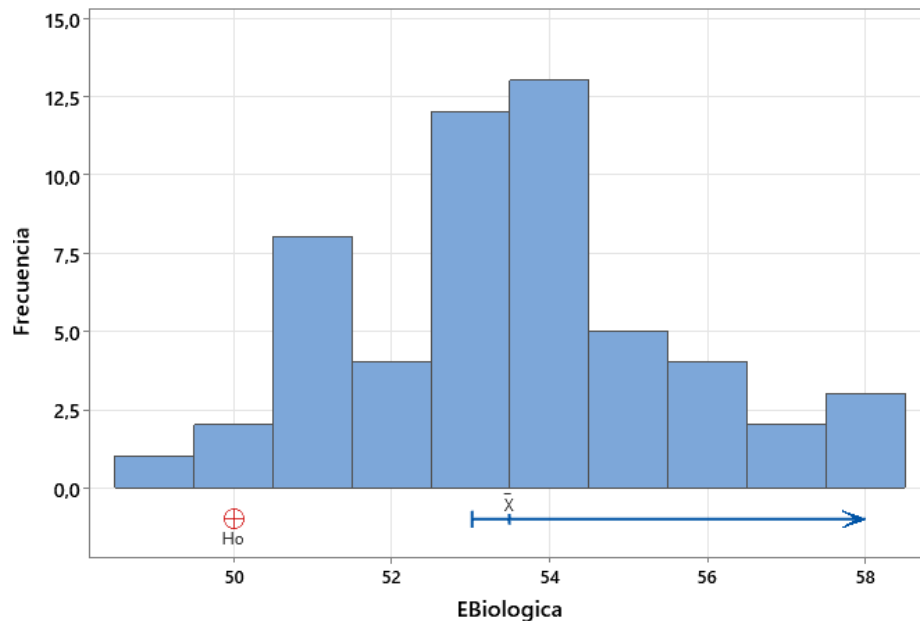


Figura 13. Contraste de hipótesis nula e histograma de Eficiencia Biológica en Etapa 4.

El histograma presentado en la Figura 13 permite observar la forma de la distribución de los datos de eficiencia biológica en la etapa 4. La inclusión del círculo sobre la leyenda “Ho” representa la hipótesis nula ($H_0: \mu = 50\%$) y \bar{X} barra representa la media muestral (53,49%) junto al intervalo de confianza al 95% para la media poblacional, lo cual permite establecer una lectura clara de que la hipótesis nula se encuentra alejada del centro de la distribución, fuera del intervalo estimado para la media. Esto no solo valida visualmente la prueba t, sino que evidencia que los valores se agrupan consistentemente en torno a un rendimiento superior al umbral mínimo esperado.

Lo que destaca de esta gráfica es que la hipótesis nula aparece fuera del intervalo de confianza y alejada del centro de la distribución, lo cual indica que es muy poco probable que los datos provengan de una población con una media igual al 50%. Esta evidencia gráfica respalda visualmente el resultado de la *prueba t* de una muestra y sugiere que la eficiencia biológica lograda bajo condiciones de automatización total es significativamente mayor al valor de referencia planteado como umbral mínimo.

Además, se puede observar que la mayoría de las observaciones se agrupan de forma consistente alrededor de valores superiores

al 50%, lo que refuerza la conclusión de que el sistema no solo es estable, sino también eficaz para potenciar el rendimiento productivo del cultivo.

Además, la Figura 14 ofrece una vista detallada de cada una de las 54 observaciones individuales junto al intervalo de confianza del 95% para la media. A diferencia del histograma, esta gráfica permite identificar

con precisión la dispersión de los datos y verificar la ausencia de valores atípicos que pudieran distorsionar los resultados. Se observa que todas las mediciones se agrupan estrechamente alrededor del promedio y ninguna cae cerca del umbral de 50% representado por la hipótesis nula, lo cual refuerza la interpretación de un proceso estable, uniforme y confiable bajo condiciones de automatización total.

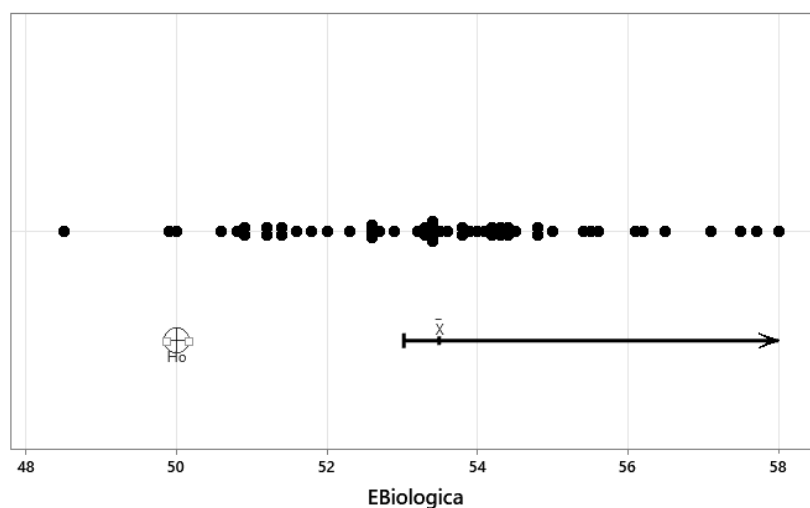


Figura 14. Contraste de Hipótesis nula y datos individuales del experimento. (Uso software Minitab)

Con base en el tratamiento aplicado a la eficiencia biológica en la Etapa 4, es posible afirmar que el sistema de automatización total tuvo un impacto claramente positivo en el desempeño del cultivo. La eficiencia biológica promedio alcanzada fue de 53,49%, valor significativamente superior al umbral de referencia del 50% con un nivel de confianza del 95%. Este resultado no solo es estadísticamente válido como lo demuestran la prueba t de una muestra y el intervalo de confianza estimado, sino también respaldado por la baja variabilidad

observada, con una desviación estándar de 2,07 y por la gráfica de control tipo I, que evidencia un comportamiento estable y predecible del proceso. En conjunto, estos hallazgos permiten concluir que, bajo condiciones de automatización total utilizando el tratamiento 5, se logra un rendimiento consistente y dentro de los límites de control, lo que fortalece la confiabilidad del sistema para futuras cosechas. Además, se consolida la hipótesis de que la automatización basada en tecnologías IoT no solo mejora las condiciones microambientales,

sino que también permite escalar el proceso productivo con mayores niveles de eficiencia, calidad y sostenibilidad.

Discusión

Los resultados obtenidos en las etapas 1 a 3 para la variable “días de incubación” muestran diferencias importantes al compararlos con estudios recientes que integran tecnologías IoT en el cultivo de hongos. Por ejemplo, un estudio reportó un período de incubación reducido a 21,67 días gracias al uso de un sistema automatizado con control de temperatura, humedad y ventilación (14); de forma similar, investigaciones anteriores efectuadas evaluaron diferentes combinaciones de sustratos, como bagazo de caña de azúcar (S), aserrín (A), café (C) y tallo de maíz (M) en diferentes proporciones, destacándose los tratamientos T8 (C+A+M+S), T10 (A+M+S), T11 (C+A+M) y T12 (C+A+S), los cuales registraron incubaciones de hasta 26 días con condiciones variables de temperatura entre 7 y 34 °C (14-15). Estos resultados se alinean con los tiempos logrados en este estudio y resaltan cómo la elección del sustrato influye significativamente en la colonización del micelio.

De manera similar, investigaciones más antiguas realizadas ya habían confirmado que los subproductos lignocelulósicos con alta retención de humedad y contenido de celu-

losa influyen significativamente en la tasa de colonización y el rendimiento, con tiempos de incubación entre 25 y 28 días (16). En tiempo más recientes, se observaron rangos entre 15 y 30 días en función de las mezclas empleadas agregando 1 % CaCO₃, relación comparable con este proyecto, observando que el micelio coloniza más rápido con mezcla, incluso en especies cercanas como *Pleurotus columbinus*, reforzando así la importancia de ajustar la composición del sustrato para potenciar los resultados (17). En este sentido, aunque el tratamiento T5 logró un desempeño destacado, los datos sugieren que aún existe margen de mejora si se incrementa la precisión del control microclimático y se incorporan respuestas automatizadas más ágiles.

En cuanto a la eficiencia biológica observada en las etapas 1 y 2, aunque adecuadas, contrastan con evidencias de otros estudios en los que fueron evaluadas combinaciones de tres tratamientos de residuos agroindustriales, el primero con residuo de uva y tusa de maíz obteniendo eficiencias biológicas de 53,1 a 87,2%, el segundo tratamiento de residuo de aceituna y tusa de maíz con eficiencias biológicas de 36,1 a 66,7% y el tercer tratamiento con residuo de uva y residuo de aceituna obteniendo eficiencias biológicas de 45,5 a 90,2% (18). Por otro lado, para las etapas 3 y especialmente la 4, donde se implementó un sistema completamente automatizado, los resultados son comparables con los reportados en un

estudio reciente, quienes lograron una eficiencia biológica del 91,2 % utilizando un sistema IoT de monitoreo y control continuo (14).

Un caso interesante se encontró un aumento de producción del 29 % al comparar un sistema automatizado IoT con uno manual, obteniendo 5.306 kg frente a 4.118 kg (19). Esta investigación se destaca además por el uso de energía solar renovable, lo que resalta la importancia de no solo automatizar el monitoreo, sino también el control dinámico del entorno de cultivo que puede traducirse en mejoras tangibles en la productividad.

Otro estudio encontró que el uso de un sistema de control automático mediante controladores PI por eventos (aplicado con sensores de temperatura, humedad, CO₂ y luz) permitió mantener condiciones ideales dentro del invernadero: temperatura estable a 25 °C, humedad relativa al 70 %, ventilación continua y luz de 100 lux y que estas condiciones generadas artificialmente propiciaron una alta eficiencia biológica, alcanzando un valor del 75 %, gracias a la estabilidad del microclima, lo que supera los estándares esperados para cultivos de *Pleurotus ostreatus* tradicionales (20).

Particularmente relevante es un estudio que presentó características altamente afines con el enfoque desarrollado en esta investigación, ya que evaluó tres niveles de

tecnificación para el cultivo de *Pleurotus ostreatus*; el primer modelo, de tipo artesanal y sin control activo de variables, dependía de las condiciones ambientales locales y mostró bajos niveles de eficiencia biológica: 20,45% en CENIDET y 50,10% en Lomas de Ahuatepec; en cambio, un segundo sistema basado en Arduino UNO, equipado con sensores DHT11 para regular temperatura (25–29 °C) y humedad relativa (80–90%), además de incluir riego automatizado y ventilación constante, logró eficiencias significativamente superiores, entre 118,6% y 184,61%; por último, el sistema más avanzado, que integró un microcontrolador PIC16F877A con control automatizado de riego, ventilación e iluminación, así como visualización de datos en pantalla LCD, demostró un rendimiento equiparable o incluso superior al sistema Arduino, gracias a su capacidad para mantener condiciones óptimas de forma sostenida (21). Estos niveles de desempeño ilustran el impacto positivo que puede tener la automatización progresiva en el cultivo de hongos comestibles.

En este contexto, los resultados alcanzados en la Etapa 4 en este estudio, con una eficiencia biológica promedio del 53,49 % bajo condiciones de automatización total, se alinean con hallazgos previos reportados en estudios nacionales sobre el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Por ejemplo, un trabajo publicado en la revista NOVA (22) evaluó la utilización de residuos lignocelulósicos como aserrín, bagazo de caña, cascarilla de

café y tallo de maíz, obteniendo eficiencias superiores al 50 % en algunas combinaciones, especialmente aquellas que favorecen la retención de humedad y la aireación del micelio, aunque en ese estudio no se implementaron tecnologías de automatización, sus resultados destacan la relevancia del diseño del sustrato como variable crítica para el rendimiento, la cual en esta investigación se ve potenciada al combinarse con herramientas IoT que permiten mantener condiciones ambientales estables en tiempo real.

En síntesis, si bien el tratamiento T5 permitió una incubación adecuada y un desempeño técnico-económico favorable, el análisis comparativo sugiere que la incorporación de un sistema IoT aún más robusto con sensores adicionales y algoritmos de control adaptativo podría optimizar aún más el proceso; específicamente, se vislumbra la posibilidad de reducir los tiempos de incubación y aumentar la eficiencia biológica, abriendo camino a una nueva etapa de desarrollo basada en inteligencia ambiental, análisis de datos en tiempo real y decisiones automatizadas de alto impacto.

Por otra parte, es importante reconocer algunas limitaciones que deben ser consideradas para futuras investigaciones. En primer lugar, los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas propias del corregimiento de Obonuco, Nariño, lo que podría limitar la extrapolación de los hallazgos a otras regiones con características

agroecológicas distintas; en segundo lugar, la evaluación se centró exclusivamente en el tratamiento T5 durante la etapa de automatización total, lo que impide establecer comparaciones directas con otras formulaciones de sustrato bajo los mismos niveles tecnológicos, además, el sistema automatizado utilizado no incorporó sensores para variables adicionales como la concentración de CO₂ o la luminosidad, factores que también podrían influir en el desarrollo del micelio y el rendimiento final, por último, el presente estudio no abordó el análisis económico del sistema implementado incluyendo aspectos como inversión inicial, costos de mantenimiento, consumo energético y escalabilidad, elementos cruciales para valorar su viabilidad en contextos productivos de mayor escala y su implementación práctica a nivel comercial.

Conclusiones

La implementación de un sistema automatizado de monitoreo y control ambiental basado en IoT demostró ser eficaz para mantener las condiciones óptimas requeridas en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*, mejorando la estabilidad de variables críticas como temperatura, humedad relativa, iluminación y concentración de CO₂.

La automatización del proceso permitió disminuir significativamente la necesidad de intervención constante del productor,

optimizando el uso del tiempo y reduciendo posibles errores humanos en la regulación de los parámetros ambientales.

El uso de tecnologías de bajo costo y código abierto, como Arduino y sensores básicos, evidencia que es posible desarrollar soluciones tecnológicas accesibles para pequeños y medianos productores, promoviendo la democratización de la agricultura inteligente.

El sistema diseñado es adaptable y puede ser replicado en otras zonas productoras con características similares. Asimismo, su escalabilidad permite incorporar nuevas funciones, como control remoto, almacenamiento de datos en la nube y analítica predictiva.

Al optimizar recursos y aumentar la productividad de manera sustentable, este proyecto se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible, particularmente aquellos relacionados con producción responsable, innovación tecnológica y seguridad alimentaria.

Agradecimiento

El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Esta investigación fue apoyada por la Convocatoria 011 de 2023 de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, número de proceso PSIIN0301ECBTI2023.

Referencias

1. Farghaly FA, Mostafa EM. Nutritional value and antioxidants in fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus* mushroom. *J Adv Biol.* 2017;7(1). doi:10.24297/jab.v7i1.6554
2. Piska K, Sułkowska-Ziaja K, Muszyńska B. Edible mushroom *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) – its dietary significance and biological activity. *Acta Sci Pol Hortorum Cultus.* 2017;16(1):101–111. Disponible en: <https://czasopisma.up.lublin.pl/asphc/article/view/2285>
3. Muszyńska B, Kała K, Sułkowska-Ziaja K, Ekiert H. Health-promoting properties of edible mushrooms: a review. *Fermentation.* 2022;8(7):316. doi:10.3390/fermentation8070316
4. Parvez S, Rafiq M, Yousuf M. Comparative nutritional evaluation of wild edible mushrooms with meat and legumes. *Curr Res Nutr Food Sci.* 2024;12(1):45–52. doi:10.12944/CRNFSJ.12.1.04
5. Shyam Sopanrao P, Syed Abrar A, Suresh Manoharrao T, Mirza Mushtaq Vaseem B. Nutritional value of *Pleurotus ostreatus* cultivated on different lignocellulosic agro-wastes. *Innov Rom Food Biotechnol.* 2010;7:66–76. Disponible en: <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/IFRB/article/view/3364>
6. Manea D, Toma L, Vamanu E. Biotechnological alternatives to valorize agro-industrial waste using edible mushrooms: *Pleurotus ostreatus* as case study. *Front Microbiol.* 2022;13:895612. doi:10.3389/fmicb.2022.895612
7. Moreno Moreno C. Valoración de la velocidad de crecimiento y productividad del cultivo de *Pleurotus ostreatus* en tres sustratos generados a partir de residuos agroindustriales en Supía, Caldas [tesis de pregrado]. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD); 2019 [citado 2025 Jul 10]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/26576>

8. Boada Hurtado LF, Sánchez Nieves J, Wen Fung Y. Indagación exploratoria *in vitro* de la capacidad degradadora de la cepa comercial *Pleurotus ostreatus* sobre dos concentraciones de petróleo crudo. *Nova* [Internet]. 2018 [citado 2025 Jul 10];16(30):30–35. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/24629448.2833>
9. Hendinata L, Fikri AIR. Development of IoT-based temperature and relative humidity monitoring system for mushroom cultivation house. *J Ecol Technol*. 2023;10(1):95–102. doi:10.33019/jurnalecotipe.v10i1.3919.
10. Daru AF, Susanto S, Adhiwibowo W, Hirzan AM. IoT-based monitoring system for oyster mushroom cultivation. *J Telecommun Electron Comput Eng*. 2020;12(3):7–11. Disponible en: <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/575>
11. Adhiwibowo W, Daru AF, Susanto S, Hirzan AM. Internet of Thing based automatic temperature and humidity regulation model for oyster mushroom cultivation. *J Telecommun Electron Comput Eng*. 2020;12(3):7–11. Disponible en: <https://jtec.utem.edu.my/jtec/article/view/575>
12. Rani M, Ponnusamy V. Adoption of smart farming for mushroom cultivation using IoT. *Mater Today Proc*. 2023;92(2):2713–18. doi:10.1016/j.matpr.2023.01.045
13. Obando GA, Vásquez-García A, Benavides-Palacios DE, Jojoa-Martínez HF. Producción de hongo orellana (*Pleurotus ostreatus*) sobre residuos agrícolas y pastos generados en la comunidad de Obonuco, Nariño. *Rev Colomb Investig Agroind*. 2022;9(2):42–54. doi:10.23850/24220582.4865
14. Singh P, Kumar D, Maheshwari S, Rajput VK. IoT-based climate control system for cultivation of oyster mushroom *Pleurotus ostreatus* fruiting bag. *Artif Intell Sustain Agric*. 2024;3(1):32–41. doi:10.1016/j.ainsa.2023.100017
15. Gómez JPG, Andrade JLC. Producción de *Pleurotus ostreatus* sobre residuos sólidos lignocelulósicos de diferente procedencia. *Nova*. 2008;6(10):126–40. doi:10.22490/24629448.403
16. Obodai M, Cleland-Okine J, Vowotor KA. Comparative study on the growth and yield of *Pleurotus ostreatus* mushroom on different lignocellulosic by-products. *J Ind Microbiol Biotechnol*. 2003;30(3):146–9. doi:10.1007/s10295-002-0021-1
17. Dedousi A, Mpanti M, Pandelidi C, Katsaris P, Lappa I, Koutrotsios G, et al. Utilization of agro-industrial wastes and calcium carbonate for optimized mycelial colonization in *Pleurotus columbinus* cultivation. *BioTech*. 2025;14(2):34. doi:10.3390/biotech14020034
18. López AV, Cotrina DC, Vargas CT. Rendimiento del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* cultivado en diferentes sustratos a base de residuos agroindustriales de la ciudad de Tacna. *Rev Cienc Biol Ambient*. 2023;2(1):3–9. doi:10.33326/29585309.2023.1.2006
19. Rukhiran M, Rattanasak H, Koottatep S. IoT-based mushroom cultivation system with solar renewable energy integration: assessing the sustainable impact of the yield and quality. *Sustainability*. 2023;15(18):13968. doi:10.3390/su151813968
20. Rojas Centeno A. Sistema de monitorización y control de microclima en invernaderos para el cultivo de hongo seta *Pleurotus ostreatus* [tesis de maestría]. Puebla (MX): Benemérita Universidad Autónoma de Puebla; 2024. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/20859>
21. Jiménez Ramos JS. Control de las variables críticas en el cultivo de setas *Pleurotus ostreatus* [tesis]. Ciudad de México: Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico; 2025 Feb 13 [citado 2025 Jul 10]. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/9556>
22. Garzón JPG, Cuervo Andrade JLC. Producción de *Pleurotus ostreatus* sobre residuos sólidos lignocelulósicos de diferente procedencia. *Nova* [Internet]. 2008 [citado 2025 Jul 10];6(10):126–40. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/24629448.403>

© 2025 – Gabriel Andrés Obando, Edgar Rodrigo Enríquez, Germán Geovanny Gómez.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). Use, distribution, or reproduction in other forums is permitted, provided that the original author and copyright owner are credited and the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution, or reproduction is permitted that does not comply with these terms.