

Interacción entre humedad relativa y temperatura en producción de *Pleurotus ostreatus* bajo ventilación natural, nebulización y modelo mixto

*Interaction between relative humidity and temperature in *Pleurotus ostreatus* production under natural ventilation, misting and a mixed model*

Paulo Vásquez-Garay Torres ^a 

✉ pvasequezgarayt@undac.edu.pe

Luis Tibhy Acosta Trinidad ^a 

Iris Sánchez Baldeón ^a 

Víctor Paredes Atoche ^b 

^a Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Oxapampa, Perú

^b Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

Resumen

Palabras clave: Hongos comestibles; Humedad relativa; Producción agrícola; Sistemas de cultivo; temperatura ambiental

Keywords:

Ambient temperature; Crop yield; Cultivation systems; Edible mushrooms; Relative humidity

Cómo citar: Vásquez-Garay Torres P, Acosta Trinidad, LT, Sánchez Baldeón, I, Paredes Atoche, V. Interacción entre humedad relativa y temperatura en producción de *Pleurotus ostreatus* bajo ventilación natural, nebulización y modelo mixto. ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias. 2026;10(29):01-13
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.486>

Contexto: *Pleurotus ostreatus* destaca por su alto valor nutricional y funcional, incluyendo elevado contenido proteico, compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, y bajo contenido lipídico. La productividad del cultivo depende de factores ambientales, especialmente humedad y temperatura. **Objetivo:** Evaluar la interacción entre humedad relativa y temperatura ambiental en la producción diaria de *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre sustrato de paja de trigo en condiciones de ventilación natural en Oxapampa, Perú. **Metodología:** Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño observacional transversal y mediciones repetidas. Se analizaron 33 bolsas experimentales de 350 g de sustrato seco durante 15 días consecutivos, registrando producción diaria, humedad relativa y temperatura ambiental. **Resultados:** La humedad relativa mostró un efecto positivo y significativo sobre la producción de *Pleurotus ostreatus*, mientras que la temperatura ambiental no presentó un efecto independiente significativo. Se evidenció que la productividad depende de la regulación integrada del microclima. **Conclusiones:** La humedad relativa constituye el factor principal que determina la producción de *Pleurotus ostreatus*, aunque su efecto depende del nivel térmico ambiental. La regulación conjunta de la humedad y la temperatura es esencial para optimizar la productividad en condiciones de ventilación natural.

Abstract

Context: *Pleurotus ostreatus* is renowned for its exceptional nutritional and functional value, characterized by high protein content, a low lipid profile, and bioactive compounds with significant antioxidant and anti-inflammatory properties. Mushroom productivity and biological efficiency are heavily dictated by environmental variables, particularly humidity and temperature. **Objective:** To evaluate the interplay between relative humidity (RH) and ambient temperature on the daily yield of *Pleurotus ostreatus* cultivated on a wheat straw substrate under natural ventilation conditions in Oxapampa, Peru. **Methodology:** A quantitative approach was employed using a cross-sectional observational design with repeated measures. The study analyzed 33 experimental units (bags containing 350 g of dry substrate) over 15 consecutive days, during which daily yield, relative humidity, and ambient temperature were systematically recorded. **Results:** Statistical analysis revealed that relative humidity (RH) exerted a significant positive influence on *Pleurotus ostreatus* yield, whereas ambient temperature showed no significant independent effect. The findings indicate that cumulative productivity is fundamentally driven by the integrated regulation of the



microclimate rather than isolated environmental variables. **Conclusions:** Relative humidity is the primary determinant of *P. ostreatus* production; however, its efficacy is modulated by ambient thermal levels. Consequently, the synergistic management of both humidity and temperature is essential for optimizing mushroom yields in cultivation systems relying on natural ventilation.

Introducción

La producción de hongos comestibles constituye uno de los sectores de mayor crecimiento dentro de la biotecnología alimentaria, debido a su alto valor nutricional, funcional y su capacidad para transformar residuos lignocelulósicos en proteína de alto valor biológico ⁽¹⁾. Entre las especies cultivadas, *Pleurotus ostreatus* destaca por su amplia adaptabilidad a diferentes sustratos, su eficiencia biológica y su relativa facilidad de manejo en sistemas semicontrolados ⁽²⁾.

No obstante, el éxito productivo durante la etapa de fructificación depende críticamente del control del microclima, en especial de la humedad relativa (HR), la temperatura y la ventilación del ambiente de cultivo ⁽³⁾. En regiones tropicales y subtropicales con alta humedad ambiental, el manejo microclimático puede resultar complejo cuando se emplean sistemas con ventilación natural, generando posibles desequilibrios afectando el rendimiento y la calidad de los basidiocarpos ⁽⁴⁾.

Particularmente, el valor nutricional y funcional de *Pleurotus ostreatus* destaca por su elevado contenido proteico, la presencia de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, y su bajo contenido lipídico, lo que lo convierte en un alimento de alto valor biológico. La selección y optimización de sustratos lignocelulósicos para el cultivo de *Pleurotus*, ha evidenciado que la transformación de residuos agrícolas mediante la actividad enzimática del micelio genera un producto final con características nutricionales superiores ⁽⁵⁾.

También, Chowdhury et al. ⁽⁶⁾, evaluaron los atributos de rendimiento de *Pleurotus djamor* sobre diferentes sustratos agroindustriales, confirmando la viabilidad biotecnológica de estos procesos para la obtención de alimentos funcionales y la valorización de residuos orgánicos.

El contexto latinoamericano presenta condiciones particulares para el desarrollo del cultivo de hongos comestibles, tanto por la disponibilidad de sustratos lignocelulósicos como por las características climáticas predominantes en las regiones tropicales y subtropicales del continente. En el estudio de Albuja et al. ⁽⁷⁾, se evaluaron los residuos agrícolas como sustrato para la producción artesanal de *Pleurotus ostreatus* en Perú, y se logró demostrar que los materiales locales constituyen una alternativa viable y económicamente accesible para los productores rurales.

Por otra parte, Aghajani et al. ⁽⁸⁾, analizaron la influencia de la humedad relativa y la temperatura sobre el cultivo de diversas especies de *Pleurotus*, estableciendo que los rangos óptimos de humedad relativa oscilan entre 80 y 90 por ciento, mientras que las temperaturas favorables se ubican entre 18 y 25 grados centígrados. Para Hu et al. ⁽⁹⁾, las condiciones térmicas modulan directamente la tasa de crecimiento del micelio y la posterior formación de primordios de *Pleurotus ostreatus*.

Adicionalmente, Gebru et al. ⁽¹⁰⁾, evaluaron el rendimiento de *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre residuos agrícolas en condiciones controladas, evidenciando que los valores elevados de humedad relativa favorecen significativamente la biomasa fresca producida, mientras que Barba et al. ⁽¹¹⁾, realizaron una revisión exhaustiva de los factores que afectan el cultivo de *Pleurotus* spp., señalando que la humedad no solo influye en la expansión de los cuerpos fructíferos sino también en la calidad final del producto, incluyendo su textura, apariencia y vida útil en poscosecha.

Al respecto De Bonis et al. ⁽¹²⁾, optimizaron las condiciones de cultivo de *Pleurotus ostreatus* evaluando el papel de la intensidad lumínica y los parámetros ambientales sobre la dinámica de crecimiento, concluyendo

que la temperatura interactúa sinérgicamente con otros factores microclimáticos para determinar la productividad global del sistema.

En relación con lo anterior, Bugalama ⁽¹³⁾, maximizaron la producción de *Pleurotus ostreatus* en Tanzania mediante combinaciones de sustratos y optimización ambiental, destacando que la interacción entre factores climáticos explica una proporción significativa de la variabilidad en el rendimiento. De manera similar Grimm y Wösten ⁽¹⁴⁾, analizaron el cultivo de hongos en el contexto de la economía circular, argumentando que la comprensión de las interacciones ambientales es fundamental para desarrollar sistemas de producción eficientes y sostenibles.

Además de la humedad y la temperatura, la ventilación del ambiente de cultivo representa un factor complementario de importancia para el desarrollo óptimo de los cuerpos fructíferos, dado que afecta directamente el intercambio gaseoso y la concentración de dióxido de carbono en el microambiente. En palabras de Foffano et al. ⁽¹⁵⁾, demostraron que la monitorización y regulación automatizada de la ventilación mejora significativamente los parámetros productivos para el cultivo de *Pleurotus ostreatus* en regiones tropicales.

Sin embargo, aunque han existido avances en la comprensión de los factores microclimáticos que influyen en la producción de *Pleurotus ostreatus*, persiste una brecha investigativa importante respecto a los estudios con mediciones diarias, donde la mayoría de las investigaciones disponibles solo comparan los rendimientos por ola de producción, sin analizar la variabilidad diaria de los parámetros ambientales y su impacto directo sobre la producción fresca.

En atención a las consideraciones anteriores, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la interacción entre la humedad relativa y la temperatura ambiental en la producción diaria de *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre sustrato de paja de trigo en condiciones de ventilación natural en Oxapampa, Perú. En consecuencia, la pregunta problémica que guía la investigación es: ¿cómo se presenta la humedad relativa y temperatura ambiental en producción diaria de *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre sustrato de paja de trigo en condiciones de ventilación natural en Oxapampa, Perú?

Materiales y Métodos

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y un diseño observacional, de corte transversal. La estructura de los datos presenta una jerarquía de dos niveles: el nivel uno corresponde a las mediciones diarias anidadas dentro de cada bolsa experimental, y el nivel dos corresponde a las 33 bolsas que constituyen las unidades experimentales independientes. Esta configuración generó un total de 495 observaciones, proporcionando una base de datos robusta. El diseño observacional permite capturar la variabilidad natural de las condiciones ambientales sin manipulación experimental de los factores microclimáticos, lo cual refleja las condiciones reales de producción en sistemas de ventilación natural. Cada bolsa fue monitoreada individualmente a lo largo de todo el período, registrando simultáneamente la producción fresca diaria, la humedad relativa y la temperatura ambiental del ambiente de cultivo.

El estudio se llevó a cabo en la provincia de Oxapampa, región Pasco, Perú, ubicada en coordenadas UTM WGS84 18L 457263E, 8829939N, a una altitud aproximada de 1800 metros sobre el nivel del mar. La zona se caracteriza por un clima tropical húmedo con temperaturas moderadas, condiciones favorables para el cultivo de hongos comestibles. El ambiente de cultivo contó con ventilación natural mediante una ventana lateral provista de malla protectora, la cual permitió el intercambio gaseoso con el exterior sin exposición directa a corrientes de aire. Se dispuso de un sistema de nebulización para el control de la humedad relativa, el cual fue aplicado inicialmente con frecuencia diaria y posteriormente ajustado a intervalos aproximados de

48 horas, según las condiciones ambientales observadas. El período de recolección de datos se extendió durante el mes de abril de 2026.

El material biológico utilizado consistió en cepas de *Pleurotus ostreatus* cultivadas sobre sustrato de paja de trigo (*Triticum aestivum*) previamente tratado mediante hidratación y pasteurización. Cada bolsa experimental contenía 350 gramos de sustrato seco, homogeneizado y compactado de forma uniforme para garantizar condiciones equivalentes entre todas las unidades. Se prepararon un total de 33 bolsas, las cuales constituyeron las unidades experimentales independientes del estudio. Todas las bolsas fueron inoculadas con la misma cepa y mantenidas bajo condiciones idénticas de manejo durante todo el período experimental, incluyendo frecuencia de riego, ventilación y protección contra agentes contaminantes. La etapa de incubación se completó previamente al inicio del período de monitoreo, iniciando las mediciones cuando las bolsas presentaron signos evidentes de fructificación.

Para la medición de las variables ambientales se utilizó un termohigrómetro digital calibrado, el cual fue colocado en el interior del ambiente de cultivo a la altura de las bolsas experimentales. Este instrumento registró la humedad relativa expresada en porcentaje y la temperatura ambiental expresada en grados centígrados con una precisión de 0,1 unidades. La producción fresca diaria se determinó mediante una balanza de precisión digital con capacidad de 2000 gramos y sensibilidad de 0,1 gramos. Las variables del estudio fueron las siguientes: producción fresca diaria de cada bolsa, expresada en gramos por día como variable dependiente; humedad relativa promedio diaria del ambiente de cultivo, expresada en porcentaje; temperatura promedio diaria del ambiente de cultivo, expresada en grados centígrados; y día de medición, correspondiente al orden secuencial de cada registro dentro del período de 15 días consecutivos.

El protocolo de monitoreo consistió en la medición diaria de todas las variables del estudio durante un período de 15 días consecutivos. Cada bolsa experimental fue pesada individualmente en el mismo horario, registrando la producción fresca del día. Simultáneamente, se registraron los valores de humedad relativa y temperatura ambiental mediante el termohigrómetro digital ubicado en el interior del ambiente de cultivo. Los datos fueron consignados en un registro estructurado que incluyó la identificación de cada bolsa, la fecha de medición, las variables ambientales y la producción fresca correspondiente. En cuanto a las consideraciones éticas, el estudio no involucró sujetos humanos ni animales, limitándose al monitoreo de un proceso de producción agrícola con hongos comestibles. Los procedimientos de cultivo siguieron las prácticas habituales de producción artesanal sin intervención experimental que pudiera afectar el bienestar animal o humano.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un modelo lineal mixto previa comprobación de supuestos de distribución normal a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov. La ecuación del modelo propuesto fue la siguiente: $Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1(T_j) + \beta_2(HR_j) + \beta_3(HR_j \times T_j) + \beta_4(D_j) + u_i + e_{ij}$. En esta ecuación, Y_{ij} representa la producción diaria fresca de la bolsa i en el día j ; β_0 es el intercepto del modelo; β_1 es el efecto fijo de la temperatura promedio diaria; β_2 es el efecto fijo de la humedad relativa promedio diario; β_3 es el efecto de la interacción entre humedad relativa y temperatura; β_4 es el efecto fijo del día de medición; u_i es el efecto aleatorio del intercepto correspondiente a la bolsa i ; y e_{ij} es el error residual.

El análisis se realizó utilizando el software estadístico IBM-SPSS versión 27 previa tabulación en hoja de Microsoft Excel 2019, empleando el método de estimación de máxima verosimilitud restringida con estructura de covarianza de identidad. El nivel de significación establecido fue de 0.05. Previamente al ajuste del modelo, se elaboraron estadísticos descriptivos de las variables del estudio, incluyendo medidas de tendencia central, dispersión y rangos. La selección del modelo final se realizó mediante la comparación de criterios de información, privilegiando el modelo con menor valor del criterio de información de Akaike corregido.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados derivados del análisis de 495 observaciones obtenidas durante 15 días consecutivos del mes de abril de 2026, el cual expone que la producción fresca de *Pleurotus ostreatus* diaria promedio fue de 6.661 gramos por día, con una desviación estándar (DE) de 17.563 gramos, un valor mínimo de 0 gramos y un máximo de 90 gramos. Esta alta variabilidad es característica del proceso de fructificación de los hongos comestibles, donde los días sin cosecha alguna alternan con días de producción elevada que pueden alcanzar valores superiores a 80 gramos en una sola bolsa. La humedad relativa promedio diaria registrada fue de 72.467 por ciento, con una desviación estándar de 4.764 por ciento y un rango de variación entre 64 y 85 por ciento. La temperatura (temp) promedio diario fue de 22.353 grados centígrados, con una desviación estándar de 1.691 grados centígrados, variando entre 18.3 y 24.5 grados centígrados. Estos valores indican que las condiciones ambientales se mantuvieron dentro de rangos considerados adecuados para la fructificación de *Pleurotus ostreatus*. Estas variables del estudio de reflejan en la Tabla 1 para una mejor visualización y descripción detallada.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las variables del estudio.

Variable	Media	DE	Mín	Máx	Rango
Producción (g/día)	6.661	17.563	0	90	90
HR promedio (%)	72.467	4.764	64	85	21
Temp promedio (°C)	22.353	1.691	18.3	24.5	6.2

Por otra parte, los resultados del modelo lineal mixto revelaron que la humedad relativa presentó un efecto positivo significativo sobre la producción diaria fresca. Este hallazgo indica que, manteniendo constantes los demás factores del modelo, por cada punto porcentual de incremento en la humedad relativa, la producción diaria aumentó en aproximadamente 4.27 gramos y cuantifica la sensibilidad del cultivo a las variaciones en la disponibilidad hídrica del ambiente, confirmando la relevancia de este parámetro para la productividad del sistema. Sin embargo, la temperatura promedio diaria no mostró un efecto independiente significativo sobre la producción, aunque el valor p cercano al umbral de significación propone una tendencia positiva que no alcanzó significación estadística dentro del rango de temperatura observado de 18.3 a 24.5 grados centígrados, mientras que la amplitud relativamente estrecha de este rango térmico podría haber limitado la capacidad del modelo para detectar diferencias significativas.

El término de interacción entre la humedad relativa y la temperatura mostró un efecto negativo y estadísticamente significativo. Este resultado evidencia que el efecto positivo de la humedad relativa sobre la producción diaria se atenúa conforme aumenta la temperatura ambiental dentro del rango observado. En términos prácticos, a temperaturas más elevadas, el incremento porcentual adicional de humedad relativa genera un menor aumento en la producción fresca, lo que revela la existencia de una relación de moderación térmica sobre el efecto hídrico. La variable día no presentó un efecto significativo, lo que señala que la producción diaria no mostró una tendencia lineal significativa a lo largo del período de monitoreo de 15 días. Este hallazgo era esperado dado que la fructificación de *Pleurotus ostreatus* ocurre de forma episódica más que gradual.

Tabla 2. Parámetros estimados del modelo lineal mixto.

Parámetro	β	Error Estándar	p	IC 95 %	
				Inf	Sup
Intercepto	-272.435	138.727	0.050	-544.334	-0.535
HR promedio	4.265	1.767	0.016	0.801	7.728

Parámetro	β	Error Estándar	p	IC 95 %	
				Inf	Sup
Temperatura promedio	10.983	6.055	0.070	-0.885	22.850
Día	0.265	0.206	0.198	-0.138	0.668
Interacción HR $\times$ T	-0.172	0.079	0.030	-0.327	-0.017
Varianza aleatoria	0.094	0.042	0.024	0.013	0.176

La varianza aleatoria asociada a las bolsas experimentales fue de 0.094, confirmando la pertinencia de incluir el efecto aleatorio en el modelo para capturar la variabilidad entre unidades experimentales. Este resultado refleja que existe heterogeneidad significativa entre las bolsas en términos de su producción promedio, lo cual es consistente con la naturaleza biológica del proceso de fructificación.

Por último, las Figuras de la 1 a 4 complementan los resultados cuantitativos presentados; donde la Figura 1 ilustra el sistema de cultivo empleado en el estudio, mostrando la disposición de las bolsas experimentales y el sistema de nebulización instalado en el ambiente de producción; la Figura 2 presenta el protocolo de monitoreo diario implementado para la recolección sistemática de los datos; la Figura 3 muestra el diagrama de dispersión entre la producción diaria y la humedad relativa, evidenciando la tendencia positiva observada en el análisis estadístico; y la Figura 4 presenta las predicciones del modelo ajustado, ilustrando de manera visual cómo el efecto de la humedad relativa sobre la producción se modifica según el nivel de temperatura ambiental, lo cual confirma visualmente la interacción negativa detectada estadísticamente.



Figura 1. Sistema de fructificación semicontrolado con ventilación natural.



Figura 2. Monitoreo diario de temperatura y humedad relativa mediante termohigrómetro digital.

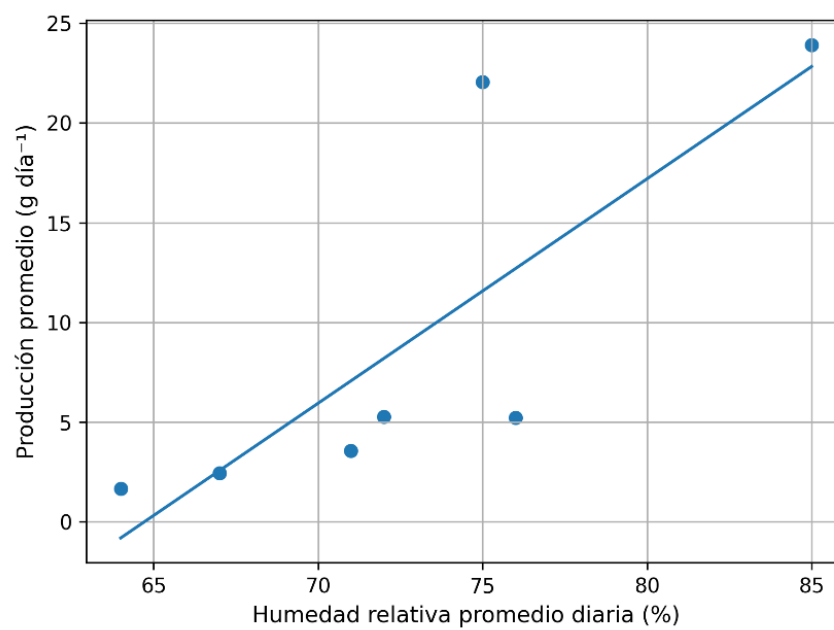


Figura 3. Producción promedio diaria de *Pleurotus ostreatus* en función de la humedad relativa promedio registrado durante el periodo experimental.

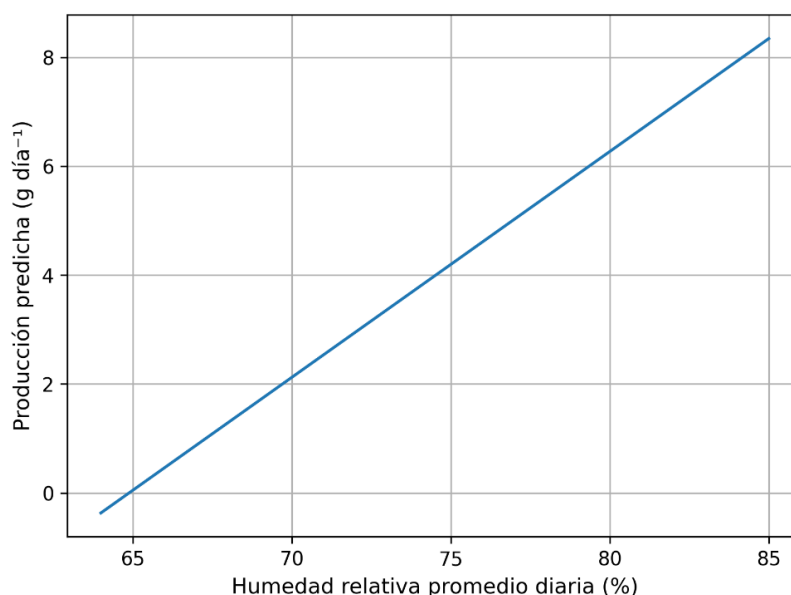


Figura 4. Producción diaria predicha según el modelo lineal mixto en función de la humedad relativa promedio, considerando el efecto de la temperatura y su interacción.

En síntesis, las evidencias mostraron una producción fresca diaria promedio de 6.66 g, con alta variabilidad, típica de la fructificación episódica de *Pleurotus ostreatus*, donde la humedad relativa promedio fue 72.5 % y la temperatura 22.4 °C, rangos adecuados para el cultivo. Además, el modelo lineal mixto realizado reveló que la humedad relativa tuvo un efecto positivo significativo, aumentando la producción 4.27 g por cada punto porcentual adicional.

Por otra parte, la temperatura no mostró efecto independiente significativo, aunque su interacción con la humedad fue negativa y significativa, indicando que el beneficio de la humedad se atenúa al aumentar la temperatura. El día no afectó la producción, y la varianza aleatoria entre bolsas fue significativa, reflejando heterogeneidad biológica.

Discusión

Los resultados del presente estudio evidencian que la humedad relativa constituye el principal factor microclimático que determina la producción diaria de *Pleurotus ostreatus* en condiciones de ventilación natural. El efecto positivo significativo de la humedad relativa confirma que la disponibilidad hídrica en el ambiente de cultivo es determinante para el desarrollo de los cuerpos fructíferos. Este hallazgo resulta consistente con lo reportado por González et al. ⁽¹⁶⁾, quienes evidenciaron que los valores elevados de humedad relativa favorecen significativamente la biomasa fresca producida por *Pleurotus ostreatus*. Además, Obando et al. ⁽¹⁷⁾, y Mohd et al. ⁽¹⁸⁾, añaden que la automatización del cultivo respecto a estos parámetros mediante tecnologías como la IoT generó disminución del tiempo de incubación y mejoró eficiencia biológica.

En contraste, Melisa et al. ⁽¹⁹⁾, analizaron la influencia de las condiciones ambientales sobre el crecimiento de *Pleurotus ostreatus* en sistemas semicontrolados y confirmaron que los efectos térmicos son más evidentes cuando las temperaturas se acercan a los extremos del rango de tolerancia de la especie, situación que no se presentó en el presente estudio, donde la temperatura promedio fue de 22.35 grados centígrados y se ubica dentro del rango óptimo, lo cual podría explicar la ausencia de un efecto independiente significativo.

Por otra parte, Melanouri et al. ⁽²⁰⁾, demostró el potencial industrial para convertir importantes residuos agrícolas de bajo valor en biomasa fúngica y enzimas, y, finalmente, en valiosos productos alimenticios,

donde las tasas de crecimiento más altas de las cepas de *P. ostreatus* se observaron en los sustratos virutas de madera de haya, paja de cebada y avena, mazorcas de maíz y corteza de arroz, con un tiempo de colonización completa que varió entre 16 y 36 días.

No obstante, es importante destacar que la falta de significación estadística del efecto independiente de la temperatura no implica que este factor carezca de relevancia biológica para la producción de *Pleurotus ostreatus*. En un estudio realizado por Suwannarach et al. ⁽²¹⁾ de los factores ambientales que afectan el crecimiento y desarrollo de los hongos comestibles, se concluyó que la temperatura regula múltiples procesos fisiológicos, incluyendo la actividad enzimática del micelio, la tasa respiratoria y la eficiencia en la utilización del sustrato. La aparente contradicción entre la relevancia biológica de la temperatura y su efecto no significativo en el presente estudio puede resolverse considerando que, dentro del rango observado, las condiciones térmicas fueron adecuadas para la fructificación, y la variabilidad residual en la producción fue explicada principalmente por las diferencias en humedad relativa.

El hallazgo más relevante del presente estudio es la significación estadística del término de interacción entre la humedad relativa y la temperatura. Este resultado indica que el efecto positivo de la humedad relativa sobre la producción diaria se atenúa conforme aumenta la temperatura ambiental dentro del rango observado. Según Cunha et al. ⁽²²⁾, las interacciones entre factores ambientales constituyen un aspecto fundamental para la comprensión de la dinámica productiva. La interacción negativa observada sugiere que, a temperaturas más elevadas, la contribución de la humedad relativa a la producción es menor, posiblemente debido a que el aumento térmico acelera la evaporación y reduce la disponibilidad hídrica efectiva en la superficie de los cuerpos fructíferos.

En esta línea, Irwanto et al. ⁽²³⁾, señalaron que la interacción entre humedad relativa y temperatura afecta tanto la cantidad como la calidad de los cuerpos fructíferos producidos, sugiriendo que el manejo integrado de ambos parámetros es esencial para optimizar los rendimientos. El coeficiente de interacción negativo observado en el presente estudio cuantifica esta relación, proporcionando evidencia empírica que respalda la necesidad de un enfoque integrado para el manejo del microclima en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*.

Las implicaciones prácticas de esta interacción son relevantes para los productores que operan en condiciones de ventilación natural, donde el control independiente de la humedad y la temperatura resulta desafiante. En este sentido Jacob et al. ⁽²⁴⁾, destacaron que la optimización simultánea de los factores ambientales es clave para maximizar la producción, y que los sistemas de producción artesanal deben implementar estrategias que contemplen las interacciones entre variables. Particularmente, Fareed et al. ⁽²⁵⁾, exponen que la optimización ambiental para la producción de hongo ostra es superior en aquellos productores que ajusten sus prácticas de manejo considerando las relaciones entre los parámetros microclimáticos, a aquellos otros que controlan cada factor de forma aislada.

En palabras de Muswati et al. ⁽²⁶⁾, los factores microclimáticos explican una proporción sustancial de la variabilidad en la producción *Pleurotus ostreatus* en clima subtropical, siendo la humedad relativa el predictor más consistente. También Torres et al. ⁽²⁵⁾ evaluaron el rendimiento de *Pleurotus ostreatus* en condiciones semicontroladas en la sierra central del Perú, observando patrones de respuesta similares a los del presente estudio, mientras que Doroški et al. ⁽²⁷⁾, analizaron la composición nutricional y el rendimiento de *Pleurotus ostreatus* cultivado sobre diferentes sustratos, confirmando que las condiciones ambientales de las regiones tropicales y subtropicales permiten obtener producciones competitivas cuando se implementa un manejo microclimático adecuado.

Un aspecto particularmente interesante observado en los datos es la posible existencia de un umbral superior de humedad relativa, por encima del cual el efecto beneficioso sobre la producción podría disminuir o revertirse. Los valores máximos de humedad relativa registrados alcanzaron 85 por ciento, y en estos niveles se observaron algunas bolsas con producción reducida, lo que podría sugerir un efecto de saturación hídrica.

Para Maccapa et al. ⁽²⁸⁾, las condiciones de humedad muy elevadas se asociaron con mayor incidencia de contaminación y menor calidad del producto cosechado de hongos ostra sobre residuos lignocelulósicos en sistemas estándar.

A diferencia de la técnica empleada, los resultados de Ovalle et al. ⁽²⁹⁾, revelan que el uso de técnicas no convencionales como la pulverización del sustrato junto con agar bacteriológico se ve respaldada por su capacidad para identificar sustratos propensos a la contaminación, un aspecto crítico, ya que dicha contaminación podría generar errores que consuman recursos valiosos si no se detecta a tiempo en ensayos tradicionales a gran escala. Asimismo, este método permitió observar primordios y estructuras reproductivas durante la fase reproductiva del hongo, elementos no analizados en la presente investigación.

Cabe resaltar que Abou et al. ⁽³⁰⁾, demostró que la combinación de residuos de poda del olivo y posos de café usados aumentó la vida útil de *Pleurotus ostreatus* fresco al disminuir el recuento microbiano total mientras retrasaba la pérdida de peso y la apertura del velo, y mantenía el contenido de carbohidratos, buena firmeza y proteína considerable, en comparación con paja de trigo independientemente de la temperatura de almacenamiento y el tipo de envase.

El presente estudio presenta limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, el tamaño muestral de 33 bolsas experimentales, aunque adecuado para el modelo mixto empleado, limita la generalización de los hallazgos a otras condiciones de cultivo. En segundo lugar, el estudio se realizó en una única ubicación geográfica, lo que restringe la extrapolación a regiones con condiciones climáticas diferentes. En tercer lugar, no se incluyó el monitoreo de la concentración de dióxido de carbono como variable adicional, a pesar de su reconocida influencia sobre la fructificación de los hongos comestibles. Finalmente, la ausencia de replicación estacional impide evaluar si los patrones observados se mantienen a lo largo de diferentes períodos del año con condiciones ambientales variables.

En atención a las limitaciones identificadas, se recomienda que futuras investigaciones aborden el estudio de la interacción microclimática mediante diseños factoriales que permitan manipular de forma controlada los niveles de humedad relativa y temperatura, evaluando sus efectos sobre la producción de *Pleurotus ostreatus*. Asimismo, se recomienda la inclusión de sensores de dióxido de carbono para evaluar la contribución del intercambio gaseoso al rendimiento productivo, así como la implementación de estudios longitudinales con períodos de seguimiento más extensos que abarquen múltiples olas de producción.

Conclusiones

La presente investigación evidenció que la humedad relativa constituye el principal factor microclimático que determinó la producción diaria fresca de *Pleurotus ostreatus* en condiciones de ventilación natural, con un efecto positivo significativo que indicó un incremento de aproximadamente 4.27 gramos de producción por cada punto porcentual adicional de humedad relativa, mientras que la temperatura ambiental, dentro del rango observado de 18.3 a 24.5 grados centígrados, no presentó un efecto independiente significativo sobre la producción diaria, aunque el valor p cercano al umbral de significación sugiere una tendencia positiva que merece investigación adicional con rangos de temperatura más amplios.

Además, la interacción significativa y negativa entre la humedad relativa y la temperatura confirmó que la productividad de *Pleurotus ostreatus* está determinada por la regulación integrada del microclima, donde el efecto benéfico de la humedad relativa se modula negativamente a medida que aumenta la temperatura, lo que evidencia la necesidad de un abordaje simultáneo de ambos parámetros para la optimización de los rendimientos productivos en sistemas de cultivo con ventilación natural.

En este sentido las implicaciones prácticas de estos hallazgos apuntan a la necesidad de priorizar el control de la humedad relativa en los sistemas de cultivo artesanal de regiones tropicales, implementando estrategias

de nebulización y regulación de la ventilación que permitan mantener niveles adecuados de disponibilidad hídrica en el ambiente de cultivo, considerando las condiciones térmicas prevalentes para maximizar el efecto de la humedad sobre la productividad.

Acerca de

Financiamiento: Los autores declaran que no recibieron financiamiento para esta investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Certificación ética: El protocolo del presente estudio fue sometido a revisión y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad, en cumplimiento de los principios éticos y normativas institucionales aplicables.

Historia del artículo: Artículo recibido 30 de abril 2026 | Aceptado 01 de JUNIO 2026 | Publicado 10 de julio 2026

Referencias

1. Mata G, Gaitán R, Salmones D, Ortega C, Durán Z, Ángeles R y Parra F. El cultivo de hongos comestibles, alternativa de soberanía alimentaria en zonas rurales en México: estudio de caso en Rancho Nuevo, Perote, Veracruz. *Scientia fungorum*. 2025;56. <https://www.scientiafungorum.org.mx/index.php/micologia/article/view/1487>
2. Nakazawa T, Kawauchi M, Otsuka Y, Han J, Koshi D, Schiphof K, . . . Honda Y. Pleurotus ostreatus as a model mushroom in genetics, cell biology, and material sciences. *Applied Microbiology Biotechnology*. 2024;108(1):217. <https://doi.org/10.1007/s00253-024-13034-4>
3. Raman J, Jang KY, Oh YL, Oh M, Im JH, Lakshmanan H y Sabaratnam V. Cultivation and nutritional value of prominent Pleurotus spp.: an overview. *Mycobiology*. 2021;49(1):1-14. <https://doi.org/10.1080/12298093.2020.1835142>
4. Grimm D, Kuenz A y Rahmann G. Integration of mushroom production into circular food chains. *Organic Agriculture*. 2021;11(2):309-17. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00318-y>
5. Silva M, Ramos AC, Lidon FJ, Reboredo FH y Gonçalves EM. Pre-and postharvest strategies for Pleurotus ostreatus mushroom in a circular economy approach. *Foods*. 2024;13(10):1464. <https://doi.org/10.3390/foods13101464>
6. Chowdhury G, Sharma R y Sarkar U. Cultural Studies and Yield Attributes of Pink Oyster Mushroom (Pleurotus djamor) in West Bengal. *BioResources*. 2024;19(1). <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.1696-1706>
7. Albuja R, Álvarez AR y Reyes JJ. Evaluación de residuos agrícolas, como sustrato para la producción artesanal del Hongo Ostra (Pleurotus Ostreatus). *CEDAMAZ*. 2024;14(1):14-7. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v14i1.1593>
8. Aghajani H, Bari E, Bahmani M, Humar M, Ghanbary MA, Nicholas DD y Zahedian E. Influence of relative humidity and temperature on cultivation of Pleurotus species. *Maderas Ciencia y tecnología*. 2018;20(4):571-8. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005004501>
9. Hu Y, Xue F, Chen Y, Qi Y, Zhu W, Wang F, et al. Effects and mechanism of the mycelial culture temperature on the growth and development of Pleurotus ostreatus (Jacq.) P. Kumm. *Horticulturae*. 2023;9(1):95. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9010095>
10. Gebru H, Belete T y Faye G. Growth and yield performance of Pleurotus ostreatus cultivated on agricultural residues. *Mycobiology*. 2024;52(6):388-97. <https://doi.org/10.1080/12298093.2024.2399353>

11. Barba M, Assumpção F, Aparecida H, Lopes G, Ávila S, Silveira P, et al. Factors affecting mushroom *Pleurotus* spp. Saudi Journal of Biological Sciences. 2019;26(4):633-46. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>
12. De Bonis M, Pecchia JA y Nicoletto C. Optimizing *Pleurotus ostreatus* cultivation: the role of light wavelengths and substrate composition on yield and nutritional value. Frontiers in Horticulture. 2025;4:1720226. <https://doi.org/10.3389/fhort.2025.1720226>
13. Bugalama W. Maximizing production of *Pleurotus ostreatus* (Oyster) in Tanzania. Australian Journal of Crop Science. 2025;19(4):442-8. <https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.04.p331>
14. Grimm D y Wösten HA. Mushroom cultivation in the circular economy. Applied microbiology biotechnology. 2018;102(18):7795-803. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8>
15. Foffano MO, Michel RC, Freire DM y Cavalcanti ED. Design and Evaluation of a Compact IoT-Enabled Microfarm for Decentralized Urban Agriculture Applied to the Cultivation of *Pleurotus ostreatus* (Oyster Mushroom). Sustainability. 2025;17(22):10332. <https://doi.org/10.3390/su172210332>
16. González DE, Ortiz JE, Mejía Y, García LS y Cifuentes X. Evaluación de la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*. Revista Ion. 2020;33(1):93-102. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020009>
17. Obando GA, Enríquez ER y Gómez GG. Tecnologías IOT aplicadas al cultivo de *pleurotus ostreatus*, hongo de relevancia nutricional y terapéutica, en ambientes controlados. Revista Nova. 2026;24(46):11-43. <https://doi.org/10.22490/24629448.10557>
18. Mohd MA, Ramli MI, Zainol Z, Mohd MN, Ismail M, Adnan R, et al. Enhanced IoT-Based Climate Control for Oyster Mushroom Cultivation Using Fuzzy Logic Approach and NodeMCU Microcontroller. Pertanika Journal of Science Technology. 2021;29(4). <https://doi.org/10.47836/pjst.29.4.34>
19. Melisa M, Oliveira ML, Wanderley D, Gonçalves W y Cunha D. Technologic development on *Pleurotus* cultivation: specific practices used in Brazil. Brazilian Archives of Biology Technology. 2021;64. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200198>
20. Melanouri EM, Dedousi M y Diamantopoulou P. Cultivating *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii* mushroom strains on agro-industrial residues in solid-state fermentation. Part I: Screening for growth, endoglucanase, laccase and biomass production in the colonization phase. Carbon Resources Conversion. 2022;5(1):61-70. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.12.004>
21. Suwannarach N, Kumla J, Zhao Y y Kakumyan P. Impact of cultivation substrate and microbial community on improving mushroom productivity: A review. Biology. 2022;11(4):569. <https://doi.org/10.3390/biology11040569>
22. Cunha D, Sánchez JE, Noble R y Pardo A. Use of spent mushroom substrate in new mushroom crops to promote the transition towards a circular economy. Agronomy. 2020;10(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy10091239>
23. Irwanto F, Hasan U, Lays ES, De La Croix NJ, Mukanyiligira D, Sibomana L y Ahmad T. IoT and fuzzy logic integration for improved substrate environment management in mushroom cultivation. Smart Agricultural Technology. 2024;7. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100427>
24. Jacob ID, Jacob DE, Izah SC y Eniang EA. Risk, Precautions, Environmental and Economic Considerations in Edible Mushroom Propagation. Bioactive Compounds in Edible Mushrooms: Sustainability and Health Applications: Springer; 2025. p. 1-46. https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-3-031-80050-4_35
25. Fareed MA, Shabbir MA, Sattar S, Imdad M, Aslam H, Mutti A, et al. Advances in Mushroom Cultivation Technologies: Substrate Optimization, Controlled Environment and Strategies for Yield Enhancement. SciNex Journal of Advanced Sciences. 2026;1(2). https://www.researchgate.net/publication/400077361_Advances_in_Mushroom_Cultivation_Technologies_Substrate_Optimization_Controlled_Environment_and_Strategies_for_Yield_Enhancement

26. Muswati C, Simango K, Tapfumaneyi L, Mutetwa M y Ngezimana W. The effects of different substrate combinations on growth and yield of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *International Journal of Agronomy*. 2021;2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/9962285>
27. Doroški A, Klaus A, Režek A y Djekic I. Food waste originated material as an alternative substrate used for the cultivation of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*): a review. *Sustainability*. 2022;14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912509>
28. Maccapa L, Palao LA y Chura EJ. Producción de hongo ostra (*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm) sobre residuos lignocelulósicos en la provincia de Puno. *Revista de Ciencias Agrarias*. 2024;9(1):16-22. <https://doi.org/10.53719/rca.2024.868>
29. Ovalle TM, Escalante NI y Romo P. Uso de un medio semi-sintético como herramienta para la evaluación del crecimiento vegetativo del hongo ostra *Pleurotus Ostreatus*. *Tlatemoani: revista académica de investigación*. 2024;15(45):130-49. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9737141>
30. Abou S, El Sebaaly Z y Sassine YN. *Pleurotus ostreatus* grown on agro-industrial residues: studies on microbial contamination and shelf-life prediction under different packaging types and storage temperatures. *Foods*. 2023;12(3):524. <https://doi.org/10.3390/foods12030524>