Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA CÁMARA DE MORFOGÉNESIS FÚNGICA INTELIGENTE

Raúl Omar Herrera Arroyo[1]; Cristal Yoselin Moreno Aguilera[1]; Juan José Martínez Nolasco[1]; Miguel Ángel Gómez Jiménez[2]; María Susana Acosta Navarrete[2]; Raúl René Robles Lacayo[2] y Fernando Germán Flores Guillén[2].

[1]Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya. Antonio García Cubas 600, Celaya, 38010 México. [2] Departamento de ciencias agropecuarias. Tecnológico Nacional de México / IT Roque. Carretera Juventino Rosas - Celaya Km. 8, 38110 Celaya, Gto. Autor de correspondencia: d2603012@itcelaya.edu.mx

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla el diseño conceptual de una cámara de morfogénesis fúngica inteligente para el cultivo de *Pleurotus spp.*, basada en el control de variables ambientales críticas. El sistema fue diseñado dentro de un contenedor tipo FEU, integrando sistemas de ventilación, humidificación, temperatura, riego y monitoreo mediante una arquitectura IoT. A partir del dimensionamiento realizado, se establecieron los actuadores a utilizar para el control de las variables de temperatura, humedad, CO_2 e iluminación. El modelado tridimensional en SolidWorks® permitió definir la distribución de los componentes y optimizar el aprovechamiento del volumen disponible. El diseño propuesto constituye una base funcional para el desarrollo de sistemas automatizados de producción fúngica en ambientes controlados.

Palabras clave: *Cámara de morfogénesis, Ambiente controlado, IoT, Cultivo de hongos, Monitoreo y control ambiental*

ABSTRACT

This work presents the conceptual design of an intelligent fungal morphogenesis chamber for the cultivation of *Pleurotus spp*., based on the control of critical environmental variables. The system was designed within a FEU-type container, integrating ventilation, humidification, temperature control, irrigation, and monitoring systems through an IoT-based architecture. Based on the system dimensioning, the actuators required for controlling temperature, humidity, CO_2, and lighting variables were defined. Three-dimensional modeling in SolidWorks® enabled the definition of component distribution and optimization of the available volume. The proposed design provides a functional basis for the development of automated mushroom production systems in controlled environments.

Keywords. *Morphogenesis chamber, Controlled environment, IoT, Mushroom cultivation, Environmental monitoring and control.*

INTRODUCCIÓN

La producción de hongos comestibles y medicinales ha ganado gran importancia en el sector agroalimentario debido a su gran valor nutricional y su potencial biotecnológico (Romero et al., 2025). El éxito de estos cultivos depende de la morfogénesis fúngica, el cual es un proceso biológico en donde el hongo pasa de su etapa de micelio a formar cuerpos fructíferos o setas (Virágh et al., 2022). Este proceso es muy sensible a las variables ambientales como la temperatura ambiente (TA), la humedad relativa ambiental (HR) y la concentración de CO_2. Si estas variables no son controladas, el rendimiento de la producción se ve reducido, afectando la viabilidad económica (Jacob et al., 2025).

Hoy en día, muchos sistemas de cultivo tradicionales se basan en ajustes manuales que no logran mantener la estabilidad requerida en las variables ambientales. Esta inexactitud ocasiona que las cosechas tengan características variadas, lo cual dificulta el estudio del crecimiento de los hongos (Lee et al., 2025). Con la llegada de la agricultura digital, el uso de sensores inteligentes y sistemas automatizados basados en el Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una solución innovadora., ya que permiten el monitoreo y control del ambiente en tiempo real, mejorando el desarrollo de los cultivos y reduciendo el error humano (Foffano et al., 2025).

A pesar de estas ventajas, es necesario desarrollar equipos especializados y accesibles que logren mantener este control en las variables ambientales para producir o realizar investigación. Por lo cual, este trabajo muestra la metodología que se siguió en el diseño de un sistema automatizado para el monitoreo y control ambiental. El propósito de este estudio es el diseño teórico de una cámara para morfogénesis fúngica inteligente, la cual incluya varios sensores y dispositivos de control para regular automáticamente las variables ambientales, para su posterior implementación. Se plantea como hipótesis que la implementación de este diseño conceptual permitirá una mayor estabilidad en las variables ambientales dentro de la cámara, mejorando las condiciones para el desarrollo fúngico en comparación con los métodos convencionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del diseño de la cámara de morfogénesis fúngica inteligente se centró en el control automático de las variables ambientales de cultivo de hongos. El desarrollo se dividió en cuatro fases principales: 1) Definición de requerimientos funcionales del sistema; 2) Diseño estructural y distribución interna del sistema; 3) Selección de materiales y componentes tecnológicos, y 4) Modelado 3D mediante herramientas de diseño asistido por computadora (CAD). Los requerimientos funcionales del sistema se definieron tomando en cuenta las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento y desarrollo adecuado de hongos, tomando como

principal género el *Pleurotus sp*. En particular, se consideraron variables ambientales como TA, HR, la ventilación y la renovación del aire dentro de la cámara, ya que estos factores influyen directamente en la formación y calidad de los cuerpos fructíferos (Silva et al., 2024). También se buscó la distribución uniforme del microclima para evitar zonas con condiciones diferentes, que pudiera afectar el desarrollo del cultivo.

Para el caso particular del *Pleurotus sp*, se debe mantener la humedad relativa entre 85% y 95%, así como la temperatura entre 18 ºC y 25 ºC. Además, este tipo de hongos requieren mantener el CO_2 por debajo de 1000 ppm para evitar malformaciones en los cuerpos fructíferos (Lin et al., 2022). Para el diseño estructural de la cámara se tomó como base un contenedor metálico marítimo tipo FEU con dimensiones interiores de 12.03 m x 2.35 m x 2.39 m, el cual proporciona un volumen de 67.7 m^3 útiles para el cultivo de hongos. En su interior se colocaron estantes plásticos de cinco niveles capaces de sostener dos recipientes para cultivo por nivel. Esta configuración permite maximizar el aprovechamiento del volumen disponible y garantizar una adecuada circulación del aire en todos los niveles de cultivo. La distribución interna fue diseñada para mantener dos pasillos de mantenimiento, facilitando el acceso a los sistemas de monitoreo, humidificadores, aires acondicionados y ventilación.

El diseño del sistema de monitoreo y control ambiental, que se muestra en la Figura 1, se basó en una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT) estructurada en tres capas, siguiendo el modelo propuesto por Sethi & Sarangi (2017), la cual permite el control automático del microclima para el desarrollo fúngico:

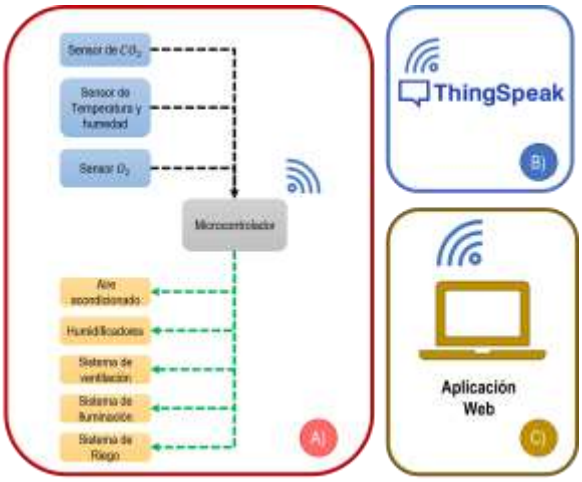

Figura 6. Arquitectura del sistema IoT propuesto: A) capa de percepción, B) capa de red, C) capa de aplicación

En la capa de percepción se integran sensores para la adquisición de datos de TA, HR, CO_2 y O_2 en tiempo real. Asimismo, se incluyen los dispositivos controlados encargados de ejecutar las acciones correctivas para mantener las variables dentro de los rangos recomendados de fructificación (18-25 °C y 85-95 % HR). Los

sensores fueron seleccionados priorizando que tuviesen una protección IP67 o superior para evitar fallos debido a la humedad presente en la cámara de morfogénesis y que puedan ser conectados mediante el protocolo de comunicación industrial MODBUS RS-485. El Cuadro 1 muestra los sensores propuestos, su modelo y sus rangos de medición.

Cuadro 3. Sensores propuestos para la medición de variables ambientales dentro de la cámara de morfogénesis.

Variable ambiental por medir	Modelo del sensor	Rango de medición
TA	JXBS-3001-TH-RS	-40 – 80 ◦C
HR		0% – 100% HR
CO_2	JXBS-3001-CO2-RS	0 – 5000 ppm
O_2	RS-O2-N01	0% – 25% Vol

Se plantea colocar tres juegos de sensores dentro del contenedor, con separaciones de 4 m entre ellas, asegurando de esa manera conocer el comportamiento de las variables ambientales a lo largo de la cámara de morfogénesis. Para el control de la temperatura, se plantea el uso de aires acondicionados. La selección del aire acondicionado se realizó a partir de una estimación de la carga térmica del sistema, considerando el volumen interno de la cámara (67.7 m^3). Para este análisis se empleó la ecuación 1. Obteniéndose una carga total estimada de 10.1 kW que equivale a 34,500 BTU/h ó 2.8 ton.

$$Q_{térmica} = V \cdot k \quad (1)$$

Donde $Q_{térmica}$ es la carga térmica que tendrá el contenedor (W), V es el volumen del contenedor (m^3) y k es el factor de carga térmica volumétrica (W/m^3), el cual representa las ganancias de calor asociadas a la radiación solar, condiciones ambientales externas, equipos instalados y actividad biológica dentro de la cámara. Tiene un valor aproximado de 150 W/m^3 ya que se trata de un espacio cerrado.

Con base en esto, utilizando un margen de seguridad, se seleccionó la implementación de dos unidades de aire acondicionado tipo minisplit de 1.5 ton cada una. Esta configuración permite no solo cubrir la demanda térmica del sistema, sino también mejorar la distribución del aire frío dentro de la cámara, favoreciendo la homogeneidad del microclima.

La capacidad de humidificación fue estimada considerando el volumen del sistema y las pérdidas de humedad asociadas a la ventilación y a la deshumidificación generada por los sistemas de aire acondicionado, obteniéndose una demanda aproximada entre 4 y 7 L/h. Con base a esto se plantea el uso de cuatro humidificadores ALK-MH-IN01, distribuidos en la cámara, los cuales cuentan con una capacidad aproximada de 1 L/h cada uno.

El sistema de ventilación fue diseñado para lograr una renovación completa del aire en un tiempo aproximado de 10 minutos, con el fin de evitar la acumulación de CO_2 dentro de la cámara. Considerando el volumen dentro de la cámara, se estimó un caudal de ventilación aproximado de 500 m^3/h utilizando la ecuación 2.

$$Q = \frac{60 \cdot V}{t} \quad (2)$$

Donde Q es el caudal de ventilación (m^3/h), V es el volumen de la cámara (m^3) y t es tempo de renovación del aire (min).

Por lo cual se propone utilizar dos extractores de aire de 6 in con capacidad de 520 m^3/h, ligeramente superior al valor obtenido, utilizando una configuración de un extractor de entrada de aire y uno de salida. Para el sistema de iluminación se plantea el uso de lámparas de luz fria (6500 K), priorizando una distribución uniforme dentro de la cámara para evitar zonas de sombra y garantizar un desarrollo homogéneo de los cultivos.

El sistema de riego es diseñado con una configuración de dos tuberías de distribución colocadas en el techo del contenedor. Cada línea tendrá aproximadamente 12 boquillas de microaspersión (una por metro), permitiendo una cobertura uniforme. El consumo aproximado de cada boquilla es de 0.15 L/min, resultando en un caudal aproximado de 4 L/min. Para garantizar la formación de niebla y evitar la generación de gotas grandes, se plantea el uso de una bomba capaz de suministrar presiones entre 4 y 6 bar.

Para la capa de red, la cual se encarga del procesamiento y la transmisión de la información, se propone un microcontrolador con conectividad wifi. Este dispositivo no solo ejecutará la lógica necesaria para el control de las variables ambientales en base a los datos obtenidos, sino que gestionará el flujo de datos desde los sensores hacia la plataforma web, garantizando una comunicación constante. Dentro de esta plataforma se plantea la programación de diversas alarmas para indicar si las variables ambientales se encuentran fuera de los rangos establecidos. Para la capa de aplicación, la cual representa la interfaz donde los datos se presentan al usuario, se plantea el desarrollo de una aplicación web responsiva, desde donde se visualicen los valores de las variables ambientales al interior de la cámara de morfogénesis fúngica, la visualización de las alertas y se pueda realizar la modificación de los rangos de operación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelado tridimensional conceptual de la cámara de morfogénesis fúngica se realizó mediante el software de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWorks®, el cual permitió integrar los diferentes subsistemas necesarios para el control del microclima dentro de un contenedor metálico tipo FEU. La Figura 2 muestra el modelo CAD final propuesto, en el cual se observa la disposición de la estructura interna, así como la integración de los sistemas de Aire acondicionado, humidificación, ventilación, Iluminación, riego y sensado.

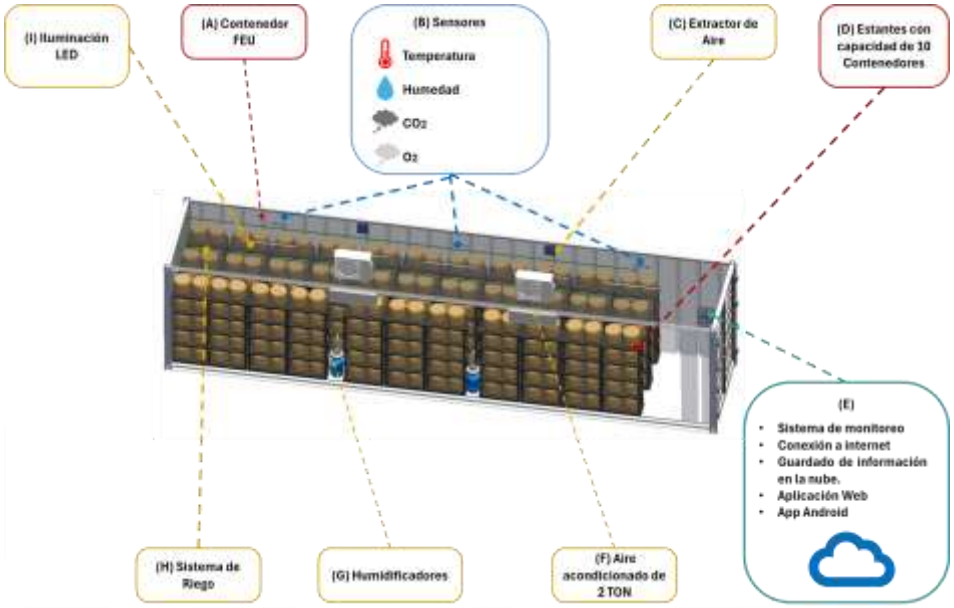

Figura 7. Modelado 3D de la cámara de morfogénesis fúngica.

En la Figura 3 se puede observar que las estanterías de cultivo se distribuyen a lo largo de los laterales del contenedor, permitiendo el aprovechamiento del volumen útil, dejando un pequeño pasillo inicial y dos pasillos centrales con el fin de facilitar las actividades de operación y mantenimiento de la cámara, favoreciendo de igual forma, la circulación del aire a lo largo del contenedor, que es fundamental para mantener homogéneas las variables ambientales.

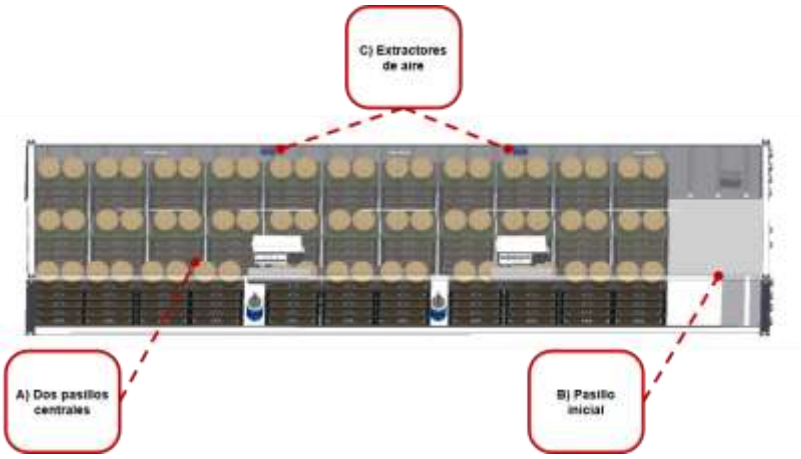

Figura 8. Distribución de la estantería de cultivo dentro de la cámara de morfogénesis fúngica.

En Cuanto al sistema de ventilación, el modelado contempla la implementación de los ventiladores o extractores de aire en una configuración de entrada y salida. A partir del dimensionamiento realizado, se obtuvo un caudal de ventilación aproximado de 500m^3/h, teniendo un tiempo de renovación del aire cercano a 10 min.

Favoreciendo el control del CO_2 y evitando perturbar en gran medida los controles de temperatura y humedad, para asegurar un desarrollo adecuado de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus spp.*

El sistema de riego se compone de dos líneas de distribución ubicadas en la parte superior del contenedor, las cuales cuentan con 12 boquillas de microaspersión cada una, ver en Figura 4, permitiendo cubrir homogéneamente el riego dentro de la cámara de morfogénesis.

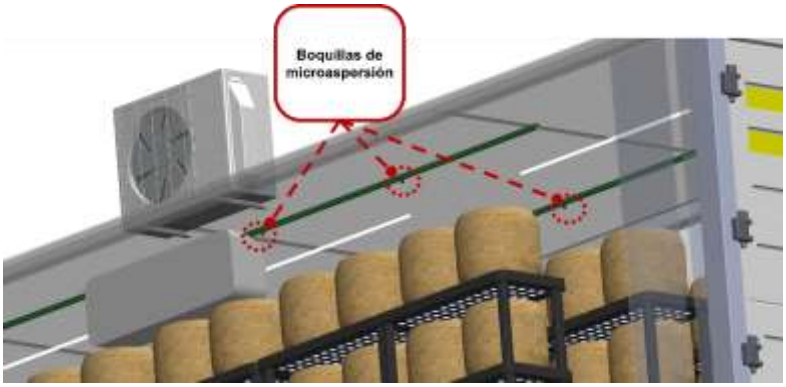

Figura 9. Sistema de riego.

Para el control de la temperatura, el modelo incorpora dos unidades de aire acondicionado tipo minisplit (ver Figura 2), cuya capacidad fue seleccionada con base en la estimación de la carga térmica del sistema, la cual fue cercana a 10.1 kW. La capacidad propuesta de 3 TON, permite mantener la temperatura dentro del rango recomendado de operación (entre 18 y 25 °C), considerando las posibles variaciones térmicas externas.

Asimismo, se integró un sistema de monitoreo basado en sensores distribuidos en tres grupos a lo largo del contenedor (Ver Figura 2), lo que permite la adquisición de datos en tiempo real de las variables ambientales como TA, HR, CO_2 y O_2. Esta disposición facilita la detección de variaciones en el microclima y permite la implementación de estrategias de control automático con el objetivo de mantener estables las variables ambientales.

CONCLUSIONES

El diseño conceptual de la cámara de morfogénesis fúngica permitió integrar los sistemas de ventilación, humidificación, riego, temperatura y sensado dentro de un contenedor tipo FEU, garantizando el control de las variables ambientales necesarias para el cultivo de Pleurotus spp.

La distribución propuesta favorece la homogeneidad del microclima, permitiendo mantener condiciones adecuadas de TA, HR y concentración de CO_2, aspectos fundamentales para el desarrollo adecuado de los cuerpos fructíferos.

Adicionalmente, la incorporación de una arquitectura basada en IoT proporciona una base para el monitoreo en tiempo real y el control automatizado del sistema, lo que representa una ventaja significativa frente a sistemas de cultivo convencionales.

En conjunto, el diseño desarrollado constituye una propuesta viable para la implementación de sistemas de producción fúngica en ambientes controlados, sentando las bases para futuras etapas de experimentación, optimización del control automático y escalamiento del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Foffano, M. O. A., Michel, R. C., Freire, D. M. G., & Cavalcanti, E. D. C. (2025). Design and Evaluation of a Compact IoT-Enabled Microfarm for Decentralized Urban Agriculture Applied to the Cultivation of Pleurotus ostreatus (Oyster Mushroom). *Sustainability*, *17*(22), 10332. https://doi.org/10.3390/su172210332

Jacob, M. S., Xu, A., Qian, K., Qi, Z., Li, X., & Zhang, B. (2025). Artificial Intelligence in Edible Mushroom Cultivation, Breeding, and Classification: A Comprehensive Review. *Journal of Fungi*, *11*(11), 758. https://doi.org/10.3390/jof11110758

Lee, K.-W., Park, C.-H., Lee, S.-C., Shin, J.-H., & Park, Y.-J. (2025). High Carbon Dioxide Concentration Inhibits Pileus Growth of Flammulina velutipes by Downregulating Cyclin Gene Expression. *Journal of Fungi*, *11*(8), 551. https://doi.org/10.3390/jof11080551

Lin, R., Zhang, L., Yang, X., Li, Q., Zhang, C., Guo, L., Yu, H., & Yu, H. (2022). Responses of the Mushroom Pleurotus ostreatus under Different CO2 Concentration by Comparative Proteomic Analyses. *Journal of Fungi*, *8*(7), 652. https://doi.org/10.3390/jof8070652

Romero, J., Oprea, O., Gaceu, L., Más Diego, S., Morris Quevedo, H., Galindo Alonso, L., Rivero Ramírez, L., & Badea, M. (2025). Edible Mushroom Cultivation in Liquid Medium: Impact of Microparticles and Advances in Control Systems. *Processes*, *13*(8), 2452. https://doi.org/10.3390/pr13082452

Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, *2017*, 1–25. https://doi.org/10.1155/2017/9324035

Silva, M., Ramos, A. C., Lidon, F. J., Reboredo, F. H., & Gonçalves, E. M. (2024). Pre- and Postharvest Strategies for Pleurotus ostreatus Mushroom in a Circular Economy Approach. *Foods*, *13*(10), 1464. https://doi.org/10.3390/foods13101464

Virágh, M., Merényi, Z., Csernetics, Á., Földi, C., Sahu, N., Liu, X.-B., Hibbett, D. S., & Nagy, L. G. (2022). Evolutionary Morphogenesis of Sexual Fruiting Bodies in Basidiomycota: Toward a New Evo-Devo Synthesis. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, *86*(1), e00019-21. https://doi.org/10.1128/MMBR.00019-21