Sistema automatizado para la producción sostenible de P*leurotus* sp.

Automated system for the sustainable production of P*leurotus* sp.

María Teresa Torres Mancera
Depto. Ingeniería Química. TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
http://orcid.org/0000-0002-4517-4456
teresa@tesco.edu.mx
Nancy Elizabeth Velázquez Salinas
Depto. Ingeniería en Mecatrónica. TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
http://orcid.org/0009-0003-6558-8909
nancy_mct@tesco.edu.mx
Nohemí Casiano-Sánchez
Depto. Ingeniería Química. TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
https://orcid.org/0009-0005-5848-6685
nohemi.iqu@tesco.edu.mx
Rogel Fernando Retes-Mantilla
Depto. Ingeniería Industrial. TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
http://orcid.org/0000-0003-2826-8060
retes@tesco.edu.mx

RESUMEN

El cultivo de *Pleurotus* sp. ofrece una alternativa para aprovechar residuos lignocelulósicos generados por la actividad agrícola y, al mismo tiempo, obtener un alimento de interés nutricional. En comunidades rurales, una de las dificultades para mantener la producción es el seguimiento de variables como temperatura, humedad y concentración de CO_2, particularmente cuando el manejo se realiza de forma manual. A partir de esta problemática, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar una arquitectura tecnológica para el monitoreo de las condiciones de producción de *Pleurotus* sp. en Temascalapa, Estado de México. La propuesta integra sensores ambientales, un microcontrolador ESP32, comunicación LoRa, una plataforma para la visualización de datos y alimentación mediante energía fotovoltaica. El desarrollo incluyó el diagnóstico del área de estudio, la identificación de los requerimientos del cultivo, la selección de los componentes electrónicos y el diseño de la arquitectura IoT. Como antecedente experimental se realizaron cultivos en recipientes de 20 L utilizando residuos lignocelulósicos de la región, con una producción aproximada de 3 kg de

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

hongo fresco por unidad. Estas pruebas se efectuaron antes de incorporar la automatización y permitieron identificar variables relevantes para el diseño del sistema de monitoreo. La propuesta obtenida constituye una primera etapa del desarrollo tecnológico; su integración física y validación durante ciclos completos de producción corresponden a etapas posteriores del proyecto.

Palabras clave: Producción sostenible; Hongos comestibles; Internet de las Cosas; Economía circular; Transferencia tecnológica.

ABSTRACT

The cultivation of Pleurotus sp. offers an alternative to take advantage of lignocellulosic residues generated by agricultural activity and, at the same time, obtain a food of nutritional interest. In rural communities, one of the difficulties in maintaining production is the monitoring of variables such as temperature, humidity and CO_2 concentration, particularly when handling is carried out manually. Based on this problem, the present work aimed to design a technological architecture for the monitoring of the production conditions of Pleurotus sp. in Temascalapa, State of Mexico. The proposal integrates environmental sensors, an ESP32 microcontroller, LoRa communication, a platform for data visualization and power supply through photovoltaic energy. The development included the diagnosis of the study area, the identification of the crop requirements, the selection of electronic components and the design of the IoT architecture. As an experimental background, cultures were carried out in 20 L containers using lignocellulosic residues from the region, with an approximate production of 3 kg of fresh mushroom per unit. These tests were carried out before incorporating automation and allowed the identification of relevant variables for the design of the monitoring system. The proposal obtained constitutes a first stage of technological development; its physical integration and validation during complete production cycles correspond to later stages of the project.

Keywords: Sustainable production; Edible mushrooms; Internet of Things; Circular economy; Technology transfer.

INTRODUCCIÓN

La producción de hongos comestibles constituye una alternativa para aprovechar materiales residuales de origen agrícola y obtener productos destinados a la alimentación. Esta característica adquiere relevancia ante la necesidad de desarrollar procesos productivos que utilicen con mayor eficiencia los recursos disponibles y reduzcan la generación de residuos. En particular, diversos subproductos lignocelulósicos pueden emplearse como materia prima para el cultivo de hongos, con lo que materiales de bajo valor económico se incorporan nuevamente a una cadena productiva (Royse et al., 2017; Grimm & Wösten, 2018; Sánchez, 2019).

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Entre los hongos comestibles cultivados, *Pleurotus* presenta características que facilitan su producción sobre materiales lignocelulósicos. Como sustratos pueden utilizarse diferentes residuos agrícolas, entre ellos paja de trigo, rastrojo de maíz, bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz y aserrín. El aprovechamiento de estos materiales permite disponer de subproductos generados por otras actividades agrícolas y utilizarlos para la obtención de biomasa fúngica. A ello se suma el interés alimentario de *Pleurotus* por su contenido de proteínas, fibra, vitaminas, minerales y diferentes compuestos bioactivos.

El empleo de residuos agrícolas como sustrato para el cultivo de *Pleurotus* permite dar un segundo uso a materiales generados durante las actividades agrícolas. Después de la producción del hongo, el sustrato remanente todavía puede destinarse a otros usos, entre ellos la elaboración de composta, el acondicionamiento del suelo o su empleo como biofertilizante. De esta manera, el cultivo puede incorporarse a estrategias de aprovechamiento de materiales compatibles con los principios de la economía circular (Geissdoerfer et al., 2020; Finimundy et al., 2023).

La producción de *Pleurotus* requiere mantener condiciones ambientales adecuadas durante el crecimiento del micelio y la formación de los cuerpos fructíferos. La temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato, concentración de CO_2 e iluminación son variables que deben vigilarse durante el proceso. Cuando su seguimiento y regulación dependen de actividades manuales, mantener condiciones uniformes durante el cultivo resulta más complejo. Por ello, el monitoreo de estas variables constituye un aspecto relevante para disminuir la variabilidad del proceso y favorecer condiciones adecuadas de producción (Royse et al., 2017; Sánchez, 2019).

En los últimos años, la Agricultura 4.0 ha promovido la incorporación de tecnologías digitales para optimizar la producción agrícola mediante el uso de redes de comunicación, sensores, plataformas de monitoreo y sistemas de control automático. Particularmente, el Internet de las Cosas (IoT) ha permitido desarrollar sistemas capaces de adquirir información sobre las condiciones de cultivo en tiempo real, procesar los datos y ejecutar acciones automáticas que mantienen las variables dentro de rangos previamente establecidos.

Estas tecnologías han demostrado reducir pérdidas de producción, mejorar la eficiencia en el uso del agua, la energía y ayudar en la toma de decisiones a partir de datos objetivos (Wolfert et al., 2017).

La aplicación de tecnologías IoT al cultivo de hongos ha mostrado resultados prometedores en sistemas de producción altamente tecnificados; sin embargo, la mayoría de los desarrollos reportados corresponden a instalaciones industriales ubicadas principalmente en Asia y Europa. Aunque se han desarrollado diferentes aplicaciones tecnológicas para el monitoreo agrícola, todavía es necesario explorar alternativas que puedan adaptarse a la producción de hongos en zonas rurales. En este trabajo se plantea integrar el monitoreo de las condiciones ambientales del cultivo, la

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

transmisión inalámbrica de los datos y el suministro de energía fotovoltaica en un sistema orientado a la producción de *Pleurotus* sp. La propuesta considera además el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos disponibles en la región, con la finalidad de relacionar el desarrollo tecnológico con las condiciones y recursos presentes en el área de estudio.

En Temascalapa, Estado de México, la actividad agrícola constituye una fuente de residuos vegetales que pueden considerarse para la preparación de sustratos destinados al cultivo de *Pleurotus* sp. El aprovechamiento de estos materiales ofrece una alternativa para incorporarlos a un proceso productivo en lugar de mantenerlos como residuos de la actividad agrícola. En este contexto, se identificó también la necesidad de contar con herramientas que faciliten el seguimiento de las condiciones ambientales del cultivo. A partir de estas necesidades se planteó el desarrollo de un sistema que permita registrar las principales variables ambientales y que pueda adaptarse gradualmente a las condiciones de producción de la zona. La integración de sensores, dispositivos IoT, sistemas fotovoltaicos y conexión inalámbrica representa una alternativa viable para incrementar la eficiencia productiva y favorecer la transferencia tecnológica hacia comunidades rurales.

En este contexto, el objetivo del trabajo fue diseñar y desarrollar un sistema automatizado para la producción sostenible de *Pleurotus* sp. mediante el monitoreo de variables ambientales, a partir de la integración de sensores, tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), comunicación inalámbrica, una plataforma digital para la adquisición y visualización de datos en tiempo real y un sistema fotovoltaico para el suministro energético. La propuesta busca proporcionar una arquitectura tecnológica de bajo costo que contribuya a optimizar el proceso de producción, fortalecer el aprovechamiento de residuos agrícolas y promover la aplicación de tecnologías de agricultura inteligente en comunidades rurales.

METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

El proyecto se está desarrollando en Temascalapa, municipio de Estado de México, que presenta actividad agrícola basada principalmente en el cultivo de maíz, cebada y avena, actividades que generan cantidades considerables de residuos lignocelulósicos susceptibles de emplearse como sustrato para la producción de *Pleurotus* sp. La selección del sitio respondió a la disponibilidad de biomasa agrícola, el interés por incorporar tecnologías sostenibles y el potencial para transferir la innovación hacia comunidades rurales (Tabla 1).

El desarrollo tecnológico se enfocó en el diseño de un sistema inteligente para el monitoreo ambiental del cultivo, considerando las condiciones productivas de la región y la futura implementación de un invernadero automatizado.

Tabla 1.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Características generales del área de estudio

Característica	Descripción
Municipio	Temascalapa
Estado	Estado de México
Clima	Templado subhúmedo
Actividad predominante	Agricultura
Principales cultivos	Maíz, cebada y avena
Residuos disponibles	Rastrojo de maíz, paja de cereales y residuos vegetales

2.2 Diseño de la investigación

El estudio se considera aplicado, con enfoque cuantitativo y de desarrollo tecnológico, orientado al diseño de un sistema automatizado para la producción de *Pleurotus* sp. mediante la integración de sensores ambientales, dispositivos IoT, conexión inalámbrica y energía fotovoltaica.

La metodología comprendió seis etapas principales: i) diagnóstico del área de estudio; ii) definición de los requerimientos del sistema; iii) selección de sensores y componentes electrónicos; iv) diseño de la arquitectura IoT; v) integración del sistema energético y de comunicación; y vi) desarrollo de la estrategia de implementación y validación preliminar.

2.3 Diseño del sistema automatizado

El sistema automatizado fue concebido como una plataforma modular integrada por cinco componentes principales: comunicación, adquisición de datos, procesamiento, visualización y alimentación energética.

Las variables ambientales fueron registradas mediante sensores electrónicos conectados a un microcontrolador ESP32, seleccionado por su capacidad de procesamiento, conectividad integrada, bajo consumo energético y compatibilidad con múltiples protocolos de comunicación. La información adquirida fue procesada localmente y transmitida mediante tecnología LoRa, permitiendo el monitoreo remoto de las condiciones ambientales del cultivo.

Los datos se enviaron a una plataforma de monitoreo para su almacenamiento y visualización en tiempo real mediante un tablero digital, facilitando el seguimiento del comportamiento del sistema y proporcionando la base para futuras estrategias de control automático.

La arquitectura fue diseñada bajo un esquema modular que permite incorporar nuevos sensores, actuadores y algoritmos de control sin alterar del sistema la estructura principal (Tabla 2).

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Tabla 2.

Componentes principales del sistema

Componente	Modelo	Función
Microcontrolador	ESP32	Procesamiento de datos
Sensor ambiental	DHT22	Temperatura y humedad relativa
Sensor de humedad	Capacitivo	Humedad del sustrato
Sensor de CO_2	MH-Z19B	Monitoreo de ventilación
Sensor de iluminación	BH1750	Intensidad luminosa
Comunicación	LoRa	Transmisión de datos
Plataforma	Dashboard IoT	Visualización de información
Alimentación	Sistema fotovoltaico	Suministro energético

2.4 Variables monitoreadas y sistema de comunicación

El sistema fue diseñado para monitorear las variables ambientales que presentan mayor influencia sobre el crecimiento y fructificación de *Pleurotus* sp.: temperatura del aire, humedad relativa, humedad del sustrato, concentración de dióxido de carbono (CO_2) e intensidad luminosa (Tabla 3).

Los sensores realizan mediciones periódicas que son adquiridas por el ESP32, procesadas localmente y transmitidas mediante tecnología LoRa hacia una plataforma de almacenamiento y visualización de datos. Esta arquitectura permite generar un registro histórico del comportamiento ambiental y constituye la base para la futura automatización del control del microclima del invernadero.

Tabla 3.

Variables monitoreadas durante el diseño del sistema

Variable	Rango de diseño	Sensor
Temperatura	18–28 °C	DHT22
Humedad relativa	80–95 %	DHT22
Humedad del sustrato	60–70 %	Capacitivo
CO_2	<1000 ppm	MH-Z19B
Iluminación	300–700 lux	BH1750

2.5 Sistema de alimentación fotovoltaica

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Para reducir la dependencia de la red eléctrica se consideró una fuente de alimentación fotovoltaica. El diseño preliminar tomó como referencia los requerimientos energéticos del ESP32, los sensores y el módulo de comunicación. El esquema contempla un panel fotovoltaico, un controlador de carga, una batería y reguladores de voltaje. Esta configuración se propuso para suministrar energía a los componentes del sistema de monitoreo y permitir posteriormente el ajuste de la capacidad instalada en función de los dispositivos que se incorporen al invernadero.

La arquitectura energética fue diseñada para permitir el funcionamiento continuo del sistema en comunidades rurales, facilitando su escalamiento conforme aumente el número de dispositivos conectados.

2.6 Producción preliminar de *Pleurotus* sp. e integración del sistema

Como parte del desarrollo del proyecto se realizaron pruebas preliminares de producción de *Pleurotus* sp. utilizando residuos agrícolas lignocelulósicos disponibles en la región. Los cultivos se establecieron en recipientes plásticos de 20 L, obteniéndose un rendimiento aproximado de 3 kg de hongo fresco por unidad de producción, resultado que confirmó la factibilidad del aprovechamiento de estos residuos como sustrato de cultivo.

La experiencia obtenida permitió definir las variables ambientales críticas que posteriormente fueron incorporadas al diseño del sistema automatizado.

La arquitectura tecnológica desarrollada integra los módulos de adquisición de datos, procesamiento, comunicación inalámbrica, monitoreo remoto y alimentación fotovoltaica en una plataforma escalable y de bajo costo, diseñada para facilitar su implementación en pequeñas unidades de producción rural. En la presente investigación se reporta el diseño y la integración conceptual del sistema, mientras que la validación operativa en condiciones reales constituye la siguiente etapa del proyecto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Requerimientos tecnológicos para el sistema automatizado

El diagnóstico realizado en Temascalapa permitió reconocer elementos de la actividad agrícola local que pueden vincularse con la producción de *Pleurotus* sp. Entre ellos se encuentra la disponibilidad de residuos lignocelulósicos provenientes principalmente del cultivo de maíz y cereales. Materiales como el rastrojo y la paja presentan características que permiten considerar su aprovechamiento como sustratos para el cultivo del hongo. A partir de esta disponibilidad y de las necesidades identificadas para el seguimiento de las condiciones de cultivo, se planteó el desarrollo de un sistema de monitoreo adaptado a las características del proyecto.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

El seguimiento de las condiciones ambientales constituye un aspecto relevante durante la producción de *Pleurotus* sp., especialmente cuando variables como temperatura, humedad relativa y ventilación se supervisan de manera manual. Las variaciones de estas condiciones durante el desarrollo del cultivo pueden dificultar el mantenimiento de un ambiente uniforme y repercutir en el crecimiento de los cuerpos fructíferos. Este comportamiento ha sido señalado también por Royse et al. (2017) y Sánchez (2019), quienes destacan la importancia de mantener condiciones ambientales apropiadas durante las diferentes etapas del cultivo.

Con la información obtenida durante el diagnóstico y considerando los requerimientos del cultivo de *Pleurotus* sp., se definieron las características técnicas del sistema propuesto. Para el monitoreo se seleccionaron cinco variables: temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato, concentración de CO_2 e intensidad luminosa. También se consideraron como criterios de diseño la transmisión inalámbrica de los datos, el bajo consumo de energía y la posibilidad de incorporar posteriormente actuadores para regular las condiciones ambientales del área de producción.

La definición de estos requerimientos constituye uno de los principales resultados del presente trabajo, ya que permitió establecer una arquitectura tecnológica orientada a resolver necesidades reales del proceso productivo, priorizando el empleo de componentes de bajo costo, tecnologías abiertas y sistemas fácilmente escalables. Este enfoque difiere de numerosos desarrollos reportados en la literatura, donde las soluciones tecnológicas están dirigidas a instalaciones industriales con elevados costos de implementación, limitando su adopción por pequeños productores (Tabla 4).

Tabla 4.

Requerimientos identificados para el sistema automatizado

Necesidad identificada	Solución propuesta
Monitoreo continuo de temperatura y humedad	Sensor DHT22
Control de humedad del sustrato	Sensor capacitivo
Monitoreo de CO_2	Sensor MH-Z19B
Medición de iluminación	Sensor BH1750
Comunicación remota	Tecnología LoRa
Operación autónoma	Sistema fotovoltaico
Visualización de datos	Dashboard IoT

Los requerimientos definidos muestran que la automatización del cultivo no depende exclusivamente de la incorporación de sensores, sino de la integración de una arquitectura tecnológica capaz de adquirir, transmitir, almacenar y visualizar información de manera continua. Bajo esta perspectiva, la propuesta desarrollada constituye una plataforma escalable que puede

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

adaptarse a diferentes condiciones de producción rural y ampliarse posteriormente mediante la incorporación de actuadores, algoritmos de control e inteligencia artificial.

3.2 Arquitectura del sistema IoT

A partir de los requerimientos establecidos se diseñó una arquitectura IoT organizada en cinco niveles: adquisición, procesamiento, comunicación, almacenamiento y visualización de datos. Esta distribución establece la función de cada componente y la forma en que la información se desplaza desde los sensores hasta la plataforma de visualización. El esquema modular se eligió para permitir que los componentes puedan incorporarse o sustituirse conforme avance la implementación del sistema.

En el primer nivel de la arquitectura se ubicaron los sensores seleccionados para registrar las variables ambientales del cultivo. Las señales obtenidas serán recibidas por el microcontrolador ESP32, encargado del procesamiento de los datos y de su preparación para la transmisión mediante LoRa. La información se enviará posteriormente a la plataforma de monitoreo, donde podrá almacenarse y consultarse mediante un tablero digital.

Esta organización permitirá disponer de registros de las condiciones ambientales una vez que el sistema sea integrado y evaluado en el invernadero.

El sistema se diseñó con una estructura modular para facilitar la incorporación posterior de otros sensores y dispositivos de control. Esta decisión permitirá realizar ajustes conforme avance el proyecto, sin tener que modificar en su totalidad la arquitectura inicialmente planteada. En una primera etapa, el sistema estará orientado al registro y seguimiento de las variables ambientales seleccionadas para el cultivo de *Pleurotus* sp. Los datos obtenidos durante su funcionamiento servirán para conocer el comportamiento de estas variables y, posteriormente, podrán utilizarse para establecer estrategias de control.

La propuesta considera las condiciones de una unidad rural de producción de hongos, por lo que se seleccionaron componentes que pueden funcionar de manera conjunta con comunicación inalámbrica de largo alcance y alimentación fotovoltaica. También se consideró el uso de tecnologías de código abierto para facilitar futuras modificaciones del sistema. A diferencia de otras aplicaciones de IoT dirigidas al monitoreo de cultivos agrícolas convencionales, en este trabajo la arquitectura se planteó a partir de las variables requeridas para el cultivo de *Pleurotus* sp. y de las condiciones previstas para su instalación en Temascalapa, Estado de México.

En esta fase del proyecto todavía no se contempla el control automático de las condiciones ambientales. Primero será necesario instalar el sistema y evaluar el funcionamiento de los sensores y la transmisión de los datos durante el cultivo. Después de esta validación podrán incorporarse actuadores para ventilación, humidificación, iluminación y regulación de la temperatura. Los

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

registros obtenidos en esta etapa también podrán utilizarse posteriormente para analizar la incorporación de algoritmos de control.

3.3 Selección y evaluación de los componentes electrónicos

El desempeño de un sistema IoT para aplicaciones agrícolas depende en gran medida de la selección adecuada de los dispositivos electrónicos que conforman la plataforma de monitoreo. En este trabajo, la elección de cada componente se realizó considerando consumo energético, criterios de precisión, facilidad de integración, disponibilidad comercial, costo y compatibilidad con tecnologías de código abierto.

Como unidad de procesamiento se seleccionó el ESP32 por las características requeridas para la integración de los sensores y módulos considerados en el sistema. El dispositivo dispone de conectividad Wi-Fi y Bluetooth, un procesador de doble núcleo de hasta 240 MHz y diferentes interfaces de comunicación, entre ellas UART, SPI e I²C. Estas prestaciones permiten conectar los sensores contemplados en la arquitectura y ofrecen alternativas para incorporar otros dispositivos durante etapas posteriores del proyecto

En comparación con plataformas ampliamente utilizadas como Arduino Uno y Raspberry Pi, el ESP32 presenta ventajas importantes para aplicaciones agrícolas de pequeña escala (Tabla 5).

Arduino Uno ofrece una programación sencilla y amplia disponibilidad de bibliotecas; sin embargo, requiere módulos externos para la comunicación inalámbrica y posee menor capacidad de procesamiento. Por su parte, Raspberry Pi dispone de mayor capacidad computacional, pero presenta un mayor consumo energético y un costo superior, lo que limita su implementación en sistemas alimentados mediante energía fotovoltaica. En consecuencia, el ESP32 representa un equilibrio entre capacidad de procesamiento, consumo energético y costo, aspectos fundamentales para el desarrollo de tecnologías dirigidas a comunidades rurales.

Para el sistema propuesto se seleccionó el ESP32 debido a que sus características permiten conectar los sensores considerados para el monitoreo y realizar el procesamiento de los datos obtenidos durante el cultivo. Además, su conectividad y bajo consumo energético resultan adecuados para la arquitectura planteada en este trabajo. El uso de dispositivos con estas características se relaciona con lo señalado por Wolfert et al. respecto a la incorporación de tecnologías para recopilar, procesar y comunicar datos en aplicaciones agrícolas. De manera similar, Bhattacharjee y Roy resaltan la importancia de considerar soluciones tecnológicas accesibles cuando se trabaja con sistemas agrícolas de pequeña escala. En el caso de este proyecto, estas características se tomaron en cuenta para diseñar una arquitectura que pueda ampliarse posteriormente mediante la incorporación de otros sensores y dispositivos de control.

Tabla 5.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Comparación de plataformas de procesamiento para sistemas IoT agrícolas

Característica	Arduino Uno	ESP32 (Sistema propuesto)	Raspberry Pi 4
Frecuencia de procesamiento	16 MHz	240 MHz	1.5 GHz
Wi-Fi integrado	No	Sí	Sí
Bluetooth	No	Sí	Sí
Consumo energético	Bajo	Bajo	Alto
Costo relativo	Bajo	Medio	Alto
Adecuado para energía fotovoltaica	Sí	Sí	Limitado
Aplicación en el sistema propuesto	No seleccionado	Seleccionado	No seleccionado

Para registrar la temperatura y la humedad relativa se seleccionó el sensor DHT22, cuyas características de medición se ajustan a las condiciones consideradas para el cultivo de *Pleurotus* sp. En el caso de la humedad del sustrato se eligió un sensor capacitivo, principalmente porque su funcionamiento evita el contacto eléctrico directo entre los electrodos y el medio húmedo, característica conveniente para las condiciones en las que será utilizado.

Para medir la concentración de CO_2 se seleccionó el sensor MH-Z19B y, para el registro de la intensidad luminosa, el sensor BH1750. Ambos dispositivos se consideraron por su compatibilidad con la arquitectura propuesta y por la posibilidad de integrarlos con el ESP32. En particular, el BH1750 utiliza comunicación I^2C, lo que facilita su incorporación al conjunto de sensores previsto para el sistema.

Con esta selección se podrán registrar cuatro aspectos del ambiente de cultivo: temperatura y humedad relativa del aire, concentración de CO_2 e intensidad luminosa, además de la humedad del sustrato mediante el sensor capacitivo.

Para la transmisión inalámbrica de los datos se seleccionó la tecnología LoRa, considerando principalmente su alcance de comunicación y su bajo consumo energético. Estas características resultan de interés para el sistema propuesto, ya que los sensores deberán enviar periódicamente las mediciones obtenidas durante el cultivo sin requerir una conexión Wi-Fi permanente. A diferencia de Wi-Fi y Bluetooth, la elección de LoRa responde a la necesidad de comunicar los dispositivos a distancias mayores dentro del área donde será instalado el sistema. Su integración con el ESP32 y los sensores seleccionados permitió establecer el esquema de comunicación de la arquitectura propuesta. Además, el diseño mantiene la posibilidad de incorporar posteriormente otros dispositivos de monitoreo o control conforme se amplíen las funciones del sistema.

3.4 Diseño del sistema fotovoltaico

Como parte de la arquitectura se consideró un sistema de alimentación fotovoltaica para suministrar energía a los componentes electrónicos. Su incorporación responde a la intención de

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

reducir la dependencia de una conexión permanente a la red eléctrica y contar con una alternativa de suministro para la futura instalación del sistema. En esta etapa se definieron los componentes principales del arreglo energético, mientras que su desempeño deberá verificarse cuando se realice la integración física de la plataforma.

Para definir la alimentación eléctrica del sistema se tomó como referencia el consumo esperado del ESP32, los sensores y el módulo de comunicación LoRa. Con base en estos requerimientos se propuso un arreglo fotovoltaico compuesto por un panel solar, un controlador de carga, una batería y un regulador DC-DC, cuyos componentes se presentan en la Tabla 6. Esta configuración corresponde a una primera aproximación, ya que la capacidad requerida deberá ajustarse una vez que el sistema esté integrado y sea posible medir el consumo de energía durante su funcionamiento.

Tabla 6.

Componentes del sistema de alimentación fotovoltaica

Componente	**Función dentro del sistema**
Panel fotovoltaico	Generación de energía eléctrica
Controlador de carga	Regulación del proceso de carga
Batería	Almacenamiento de energía
Regulador DC-DC	Estabilización del voltaje
Sistema IoT	Consumo de energía

La incorporación de energía fotovoltaica se consideró como una alternativa para suministrar electricidad a los componentes electrónicos del sistema de monitoreo. Su uso permitiría disminuir la dependencia de una conexión permanente a la red eléctrica, aspecto relevante para la instalación prevista en la zona de estudio. En esta etapa, el sistema fotovoltaico forma parte del diseño tecnológico de la propuesta; por ello, será necesario evaluar su funcionamiento una vez que el ESP32, los sensores y el módulo de comunicación LoRa operen de manera conjunta. Esta evaluación permitirá determinar si la energía generada y almacenada es suficiente para mantener el funcionamiento del sistema durante los periodos previstos de monitoreo.

Además, de acuerdo al punto de vista tecnológico, el diseño energético también favorece la escalabilidad del sistema. La arquitectura permite incrementar la capacidad instalada mediante la incorporación de paneles y baterías adicionales conforme aumente el número de sensores o actuadores integrados al invernadero, sin requerir modificaciones sustanciales en el diseño electrónico.

3.5 Producción preliminar de *Pleurotus* sp. y aportaciones del sistema

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Como parte del desarrollo del proyecto se realizaron pruebas preliminares de producción de *Pleurotus* sp. utilizando residuos agrícolas disponibles en la región de estudio. Los cultivos se establecieron en recipientes plásticos con capacidad de 20 L, empleando sustratos lignocelulósicos previamente acondicionados e inoculados con semilla comercial.

Durante las pruebas preliminares realizadas con *Pleurotus* sp. se obtuvo aproximadamente 3 kg de hongo fresco en cada recipiente de 20 L. Estos ensayos se llevaron a cabo antes de integrar el sistema de monitoreo, por lo que el rendimiento registrado corresponde al manejo empleado en esta etapa y no al efecto de la automatización. Durante el seguimiento del cultivo se observó la necesidad de vigilar con mayor regularidad las condiciones ambientales, especialmente la temperatura y la humedad relativa. Esta experiencia permitió definir las variables que posteriormente se incorporaron al diseño de la plataforma IoT.

A partir de lo observado en estas pruebas, el sistema se planteó para registrar periódicamente las condiciones del área de cultivo y disponer de información que facilite su seguimiento. En esta fase todavía no es posible determinar si el uso de la plataforma producirá cambios en el rendimiento o en las características de los cuerpos fructíferos, debido a que la arquitectura propuesta aún debe evaluarse durante su operación. En la siguiente etapa se realizarán ciclos de cultivo con el sistema instalado para relacionar los registros ambientales con la producción obtenida y evaluar su funcionamiento en condiciones de trabajo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se definió la arquitectura de un sistema para el monitoreo de las condiciones ambientales durante el cultivo de *Pleurotus* sp. La selección de sus componentes se realizó a partir de las variables que requieren seguimiento durante el proceso y de las condiciones consideradas para su futura instalación en Temascalapa, Estado de México. La propuesta integra sensores para registrar temperatura, humedad relativa, humedad del sustrato, concentración de CO_2 e intensidad luminosa, además de un microcontrolador ESP32, comunicación LoRa, una plataforma para visualizar los registros y un sistema de alimentación fotovoltaica. La organización modular permitirá incorporar otros dispositivos conforme avance la implementación y se identifiquen nuevos requerimientos de monitoreo o control.

Las pruebas de cultivo realizadas previamente permitieron obtener aproximadamente 3 kg de hongo fresco por cada recipiente de 20 L. En estos ensayos se utilizaron residuos lignocelulósicos disponibles en la región como sustrato para *Pleurotus* sp. Debido a que las pruebas se efectuaron antes de integrar el sistema automatizado, este rendimiento corresponde a la etapa preliminar del cultivo y no puede atribuirse al uso de la plataforma IoT. Sin embargo, la experiencia obtenida permitió

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

reconocer la necesidad de dar seguimiento a las condiciones ambientales y sirvió como referencia para seleccionar las variables incluidas en el sistema.

La propuesta desarrollada reúne en una misma arquitectura el monitoreo ambiental, la transmisión inalámbrica de datos mediante LoRa y la alimentación con energía fotovoltaica. Su diseño se planteó considerando una futura instalación en una unidad rural de producción de hongos y la posibilidad de ampliar progresivamente sus funciones. En esta etapa, el alcance del proyecto se concentra en el diseño del sistema y en la selección e integración de sus componentes, por lo que sus efectos sobre el rendimiento del cultivo, el consumo de recursos y las condiciones de producción deberán comprobarse experimentalmente.

La siguiente etapa del proyecto comprende la instalación de los componentes, su puesta en operación y la evaluación del sistema durante ciclos completos de cultivo. Los datos obtenidos permitirán relacionar las variaciones de temperatura, humedad, CO_2 e iluminación con el desarrollo de *Pleurotus* sp. y evaluar el funcionamiento del sistema fotovoltaico y de la comunicación LoRa. Posteriormente, y a partir de los registros obtenidos, podrá analizarse la incorporación de actuadores y algoritmos de control para regular determinadas condiciones del cultivo. Estas pruebas también permitirán establecer si la propuesta puede adaptarse a otras unidades de producción con características semejantes.

REFERENCIAS

Ahlawat, O. P., & Tewari, R. P. (2007). *Cultivation technology of oyster mushroom (Pleurotus spp.)*. National Research Centre for Mushroom.

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks, 54*(15), 2787–2805. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010

Bhattacharjee, S., & Roy, P. (2022). Smart agriculture using Internet of Things: A review. *Journal of Agriculture and Food Research, 10*, 100375. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100375

FAO. (2022). *The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Grimm, D., & Wösten, H. A. B. (2018). Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied Microbiology and Biotechnology, 102*(18), 7795–7803. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8

Kaloxylos, A., Eigenmann, R., Teye, F., Politopoulou, Z., Wolfert, S., Shrank, C., Dillinger, M., Lampropoulou, I., Antoniou, E., Pesonen, L., Nicole, H., Thomas, F., Alonistioti, N., & Kormentzas, G. (2012). Farm management systems and the Future Internet era. *Computers and Electronics in Agriculture, 89*, 130–144. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.002

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Kim, Y., Evans, R. G., & Iversen, W. M. (2008). Remote sensing and control of irrigation systems using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57*(7), 1379–1387. https://doi.org/10.1109/TIM.2007.914494

Magaña, A., Martínez-Carrera, D., & Morales, P. (2021). Cultivation of edible mushrooms as a strategy for sustainable rural development. *Journal of Fungi, 7*(10), 847. https://doi.org/10.3390/jof7100847

Martínez-Carrera, D., Morales, P., Sobal, M., Bonilla, M., Martínez, W., & Mayett, Y. (2016). The contribution of edible mushrooms to sustainable development. *International Journal of Medicinal Mushrooms, 18*(12), 1111–1123.

Royse, D. J., Baars, J., & Tan, Q. (2017). Current overview of mushroom production in the world. En D. C. Zied & A. Pardo-Giménez (Eds.), *Edible and Medicinal Mushrooms: Technology and Applications* (pp. 5–13). Wiley.

Sánchez, C. (2010). Cultivation of Pleurotus ostreatus and other edible mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology, 85*(5), 1321–1337. https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7

Sánchez, C. (2019). Fungal biology and biotechnology for edible mushroom production. *Applied Microbiology and Biotechnology, 103*(18), 7425–7437. https://doi.org/10.1007/s00253-019-10030-7

Sharma, V. P., Annepu, S. K., Gautam, Y., Singh, M., & Kamal, S. (2017). Status of mushroom production in the world. *Mushroom Research, 26*(2), 75–111.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in smart farming: A review. *Agricultural Systems, 153*, 69–80. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023

Zhang, Y., Wang, G., Wang, D., & Liu, H. (2021). Internet of Things enabled smart agriculture: Technologies and applications. *IEEE Access, 9*, 122634–122654. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109990

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.