



Invernadero Inteligente de Tamaño Compacto con Monitoreo y Control Automatizado en la Nube de AWS: Optimización de Humedad y Condiciones Ambientales

Damián Vega Polanco

José Luis Bohórquez

Miguel Izquierdo

Facultad de Ingeniería, Universidad EAN

Proyecto de grado

11 de septiembre de 2025

Tabla De Contenido

Invernadero Inteligente de Tamaño Compacto con Monitoreo y Control Automatizado en la Nube de AWS: Optimización de Humedad y Condiciones Ambientales	1
Resumen	3
Abstract	4
Invernadero Inteligente de Tamaño Compacto con Monitoreo y Control Automatizado en la Nube de AWS: Optimización de Humedad y Condiciones Ambientales	5
Marco Teórico	6
Objetivos	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos	9
Descripción Del Problema	10
Justificación	12
Metodología	15
Diseño del sistema	15
Requerimientos Del Sistema	16
Análisis De Restricciones	17
Selección De Alternativas	18
Procedimiento De Implementación	18
Análisis De Sostenibilidad	24
Discusión De Resultados	24
Conclusiones	26
Referencias	28

Resumen

La creciente urbanización y la reducción de espacios agrícolas representan un reto para la seguridad alimentaria en Colombia, especialmente en ciudades donde la dependencia del abastecimiento externo incrementa costos, huella de carbono y limita el acceso a productos frescos; además, la adopción de invernaderos compactos automatizados es baja por los altos costos, la falta de conocimiento técnico y la escasa oferta accesible. En respuesta, este proyecto propone el desarrollo y validación de un prototipo de invernadero inteligente compacto para espacios reducidos como terrazas o apartamentos, que integra sensores de humedad, temperatura, luminosidad y calidad del aire, junto con actuadores para riego, ventilación e iluminación, gestionados por un microcontrolador con conectividad WiFi que permite el monitoreo y control remoto en tiempo real mediante la nube. Su implementación busca demostrar un modelo modular, económico y de fácil instalación que optimice el uso de agua y energía, fomente la producción sostenible de alimentos en entornos urbanos y fortalezca la investigación en agricultura inteligente mediante tecnologías IoT y computación en la nube, alineándose con objetivos sociales, ambientales y de desarrollo sostenible.

Palabras clave: agricultura inteligente, invernadero compacto, seguridad alimentaria, urbanización, IoT, automatización, sensores, computación en la nube, sostenibilidad, entornos urbanos

Abstract

The growing urbanization and the reduction of agricultural spaces represent a challenge for food security in Colombia, especially in cities where dependence on external food supply increases costs, carbon footprint, and limits access to fresh products; additionally, the adoption of automated compact greenhouses remains low due to high costs, lack of technical knowledge, and limited accessible solutions. In response, this project proposes the development and validation of a compact smart greenhouse prototype for small spaces such as terraces or apartments, integrating sensors for humidity, temperature, light, and air quality, along with actuators for irrigation, ventilation, and lighting, managed by a microcontroller with Wi-Fi connectivity that enables real-time remote monitoring and control through cloud services. Its implementation aims to demonstrate a modular, low-cost, and easy-to-install model that optimizes water and energy use, promotes sustainable food production in urban environments, and strengthens research in smart agriculture through IoT and cloud computing technologies, aligning with social, environmental, and sustainable development goals.

Key Words: smart agriculture, compact greenhouse, food security, urbanization, IoT, automation, sensors, cloud computing, sustainability, urban environments

Invernadero Inteligente de Tamaño Compacto con Monitoreo y Control Automatizado en la Nube de AWS: Optimización de Humedad y Condiciones Ambientales

La creciente urbanización ha reducido la disponibilidad de espacios destinados a la producción agrícola, incrementando la dependencia de cadenas de suministro externas y la huella de carbono asociada al transporte de alimentos (Benke & Tomkins, 2017; Beacham et al., 2019). En este contexto, la agricultura inteligente ha emergido como una alternativa basada en tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la automatización y la computación en la nube, las cuales permiten optimizar la producción mediante el monitoreo continuo de variables ambientales y la toma de decisiones basada en datos (Wolfert et al., 2017; Farooq et al., 2020).

Dentro de este enfoque, los invernaderos inteligentes permiten controlar variables como temperatura, humedad, iluminación y riego mediante sensores y actuadores, mejorando la eficiencia en el uso de recursos y la productividad de los cultivos (Shamshiri et al., 2020; Bholane et al., 2021; Khan et al., 2024). Asimismo, la integración con plataformas en la nube, como Amazon Web Services (AWS), facilita el monitoreo remoto, el almacenamiento de datos y la escalabilidad de estos sistemas (Alam & Mohanty, 2021; Zhang et al., 2022).

No obstante, la adopción de estas soluciones en entornos urbanos reducidos sigue siendo limitada debido a factores como el costo, la complejidad técnica y la dependencia de conectividad estable (Farooq et al., 2020; Raja et al., 2023). En este contexto, el presente proyecto propone el desarrollo de un invernadero inteligente compacto basado en IoT y servicios en la nube, orientado a su implementación en espacios urbanos, con el fin de validar su viabilidad técnica y contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles y accesibles para la agricultura urbana (Khan et al., 2024).

Marco Teórico

La agricultura inteligente ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años debido a la integración de tecnologías digitales como el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube y la automatización. Estas tecnologías permiten optimizar la producción agrícola mediante el monitoreo continuo de variables ambientales y la toma de decisiones basada en datos, mejorando la eficiencia en el uso de recursos como el agua, la energía y los insumos agrícolas (Wolfert et al., 2017; Farooq et al., 2020; Elijah et al., 2020).

En este contexto, los invernaderos inteligentes se han consolidado como una solución tecnológica capaz de controlar de manera precisa las condiciones de cultivo. A través de sensores, es posible medir variables como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y luminosidad, mientras que los actuadores permiten intervenir sobre el entorno mediante sistemas de riego, ventilación e iluminación. Esta capacidad de control permite mantener condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas, reduciendo la variabilidad ambiental y aumentando la productividad (Bholane et al., 2021; Shamshiri et al., 2020; Khan et al., 2024).

El Internet de las Cosas (IoT) desempeña un papel fundamental en estos sistemas, al permitir la interconexión de dispositivos físicos que recopilan y transmiten datos en tiempo real. En aplicaciones agrícolas, el IoT facilita la automatización de procesos y la supervisión remota, eliminando la necesidad de intervención constante por parte del usuario. De esta manera, los sistemas pueden operar de forma autónoma, respondiendo dinámicamente a los cambios en el entorno (Tzounis et al., 2017; Farooq et al., 2020; Raja et al., 2023).

Complementariamente, la computación en la nube amplía las capacidades de los sistemas IoT al proporcionar infraestructura para el almacenamiento, procesamiento y análisis de grandes volúmenes de datos. Plataformas como Amazon Web Services (AWS) permiten gestionar dispositivos conectados, almacenar información histórica y visualizar datos mediante interfaces accesibles desde cualquier lugar. Esto no solo mejora la trazabilidad del cultivo, sino que también facilita la toma de decisiones basada en tendencias y patrones (Mekala & Viswanathan, 2017; Alam & Mohanty, 2021; Zhang et al., 2022).

En el ámbito de la agricultura urbana, los invernaderos inteligentes de tamaño compacto representan una alternativa viable para la producción de alimentos en espacios reducidos como apartamentos, terrazas o balcones. Estos sistemas responden a la necesidad de aprovechar espacios no convencionales, permitiendo a los usuarios cultivar alimentos frescos de manera local, reduciendo la dependencia de cadenas de suministro externas y disminuyendo la huella de carbono asociada al transporte (Benke & Tomkins, 2017; Beacham et al., 2019).

Diversas investigaciones han demostrado los beneficios de la automatización en sistemas agrícolas urbanos. Por ejemplo, estudios en huertos urbanos han evidenciado que la implementación de sistemas automatizados de riego puede reducir el consumo de agua en porcentajes significativos, al aplicar únicamente la cantidad necesaria según las condiciones del suelo (Martínez et al., 2020). De igual manera, la integración de sensores y plataformas en la nube ha permitido mejorar el control de variables ambientales y aumentar la eficiencia en la producción de cultivos hidropónicos (García & López, 2022). Asimismo, estudios recientes destacan que la combinación de IoT y analítica de datos puede incrementar la productividad y sostenibilidad en sistemas agrícolas urbanos (Khan et al., 2024; Subahi, 2024).

Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten desafíos importantes para la adopción masiva de estas tecnologías en contextos urbanos. Entre los principales obstáculos se encuentran los costos de implementación, la complejidad técnica de los sistemas y la necesidad de contar con conectividad estable para el funcionamiento en tiempo real. Estas limitaciones han sido ampliamente documentadas en la literatura reciente, donde se resalta la importancia de desarrollar soluciones más accesibles, modulares y fáciles de implementar, especialmente en países en desarrollo (Farooq et al., 2020; Zhang et al., 2022).

En este sentido, el presente proyecto se fundamenta en la integración de tecnologías IoT, automatización y computación en la nube para el desarrollo de un invernadero inteligente compacto, orientado a entornos urbanos. La propuesta busca no solo validar la viabilidad técnica del sistema, sino también aportar al desarrollo de soluciones sostenibles, escalables y de bajo costo que faciliten la adopción de la agricultura inteligente en espacios reducidos, alineándose con las tendencias actuales de digitalización agrícola y sostenibilidad (Khan et al., 2024; Raja et al., 2023).

Objetivos

Objetivo General

Validar el funcionamiento de un prototipo de invernadero compacto con control automatizado de humedad, temperatura y luminosidad, que envíe los datos a la nube de AWS y permita su consulta en tiempo real desde un dispositivo móvil, con el fin de monitorear el crecimiento y desarrollo de las plantas sin intervención humana directa

Objetivos Específicos

1. **Seleccionar y configurar los sensores de humedad, temperatura y luminosidad** necesarios para el funcionamiento del prototipo de invernadero compacto.
2. **Diseñar e implementar el sistema de control automatizado** que regule el riego, la ventilación y la iluminación en función de los datos capturados por los sensores.
3. **Programar la integración del prototipo con la nube de AWS**, de manera que los datos ambientales sean almacenados y puedan consultarse en tiempo real desde un dispositivo móvil.
4. **Realizar pruebas de validación del prototipo**, verificando la estabilidad de la comunicación con la nube, la precisión de los sensores y la eficacia de los actuadores en el monitoreo y control de las condiciones ambientales.
5. **Evaluar el desempeño del invernadero compacto** en términos de confiabilidad, eficiencia en el uso de recursos y capacidad de operar sin intervención humana directa.

Descripción Del Problema

La agricultura inteligente, apoyada en tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la computación en la nube y la automatización se ha consolidado como una alternativa eficiente, saludable y sostenible para la producción de alimentos. Estas soluciones permiten el monitoreo constante de variables ambientales, el control automático de riego, ventilación e iluminación, y la optimización de recursos como el agua y la energía. En países con altos niveles de urbanización, estas tecnologías han permitido desarrollar invernaderos compactos que garantizan el acceso a alimentos frescos, reducen costos de transporte y promueven un uso responsable de los recursos naturales.

No obstante, en entornos urbanos de Colombia, la implementación de invernaderos inteligentes de tamaño compacto es todavía limitada debido a múltiples factores. Entre los más relevantes se encuentran los **altos costos de instalación** de sensores y actuadores, la **falta de conocimiento técnico** para su configuración y mantenimiento, la **ausencia de conectividad confiable** en algunos sectores, y la **escasa oferta de soluciones modulares y de bajo costo** adaptadas a la realidad nacional. Esta situación genera que gran parte de la población urbana dependa del abastecimiento externo de alimentos, lo que incrementa los costos de consumo, así como, aumenta la huella de carbono por transporte y ofrecer al cliente final productos que no son orgánicos por los químicos que usan en su crecimiento.

A lo anterior se suma la problemática del **uso ineficiente de recursos hídricos y energéticos**. En Colombia, el sector agrícola representa cerca del 46% de la demanda de agua dulce (FAO, 2022), y el riego tradicional en huertas urbanas no siempre garantiza un uso racional. Sin sistemas de monitoreo y control, es frecuente el desperdicio de agua y la pérdida de cultivos por variaciones extremas de temperatura, humedad o incluso por luminosidad. Esto limita el potencial de la agricultura urbana como estrategia para mitigar el cambio climático, reducir la dependencia de mercados externos y aprovechar espacios reducidos como terrazas, patios o balcones.

La ausencia de tecnologías accesibles para el monitoreo y control de cultivos en espacios reducidos no solo limita la capacidad de producción doméstica, sino que también **desaprovecha la oportunidad de fortalecer la autosuficiencia alimentaria en ciudades altamente pobladas como Bogotá, Medellín o Cali**. Además, restringe el impacto social de la agricultura urbana, que puede convertirse en una fuente de educación ambiental y mejora de la calidad de vida.

En consecuencia, el problema central radica en la limitada disponibilidad y adopción de invernaderos inteligentes compactos, automatizados y conectados a la nube que sean técnica y económicamente viables para entornos urbanos en Colombia, lo cual restringe el desarrollo de soluciones sostenibles para la producción de alimentos en espacios reducidos.

Justificación

En Colombia y a nivel internacional, diversas investigaciones han abordado los desafíos técnicos y económicos que limitan el desarrollo y adopción de sistemas de agricultura automatizada, especialmente en entornos urbanos con restricciones de espacio. A continuación, se presentan algunos estudios relevantes junto con sus conclusiones:

"Agricultura urbana y sistemas inteligentes de riego en espacios reducidos" (Martínez, R., Pineda, L., & Torres, F., 2020 – Universidad Nacional de Colombia)

El estudio analiza la implementación de sistemas automatizados de riego y monitoreo de humedad en huertos urbanos instalados en balcones y terrazas. Se destaca que la automatización optimiza el uso del agua hasta en un 35%, mejorando la salud de las plantas. Sin embargo, se identifican retos como el costo inicial de los sensores y la falta de conocimientos técnicos por parte de los usuarios para integrar estos sistemas con plataformas de gestión de datos en la nube.

"Uso de IoT y computación en la nube para la agricultura inteligente" (García, J. & López, M., 2022 – Pontificia Universidad Javeriana)

La investigación presenta un sistema de monitoreo agrícola basado en sensores de temperatura, humedad y luminosidad, cuyos datos se transmiten a la nube mediante AWS IoT Core. Los resultados mostraron mejoras significativas en el control de condiciones ambientales y en la productividad de cultivos hidropónicos. No obstante, se señalan barreras como la disponibilidad de conectividad estable y la necesidad de capacitación técnica para el mantenimiento de los dispositivos.

"Optimización de cultivos hidropónicos mediante sistemas automatizados en entornos domésticos" (Fernández, C., 2019 – Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia)

Este estudio implementó un invernadero doméstico de tamaño compacto con control automatizado de riego y ventilación, orientado a producir hortalizas en viviendas con espacio limitado. Los resultados indicaron un incremento del 40% en la tasa de germinación y una reducción del 25% en el consumo de agua. Sin embargo, se evidenció la necesidad de soluciones modulares y económicas para masificar su uso en comunidades urbanas.

"Agricultura urbana sostenible mediante integración de energías renovables y sistemas de control" (Vargas, D. & Ramírez, P., 2021 – Universidad del Valle, Colombia)

El trabajo plantea un modelo de invernadero inteligente que combina sensores, controladores y energía solar para abastecer el consumo eléctrico de los sistemas de riego e iluminación LED. La investigación resalta que la integración de energías limpias no solo reduce costos a largo plazo, sino que también disminuye la huella de carbono del proceso productivo.

"Implementación de invernaderos inteligentes en comunidades urbanas de bajos recursos"

(Rodríguez, M., 2023 – Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO)

Este proyecto piloto se realizó en Bogotá y Medellín, dotando a 50 hogares con invernaderos compactos conectados a la nube para monitoreo de humedad y temperatura. La iniciativa evidenció mejoras en la seguridad alimentaria de las familias participantes y un alto grado de aceptación social, aunque persisten desafíos relacionados con el mantenimiento preventivo y la reposición de sensores dañados.

En síntesis, si bien las investigaciones revisadas evidencian el potencial de la agricultura inteligente en entornos urbanos, persisten desafíos relacionados con la accesibilidad económica, la facilidad de uso y la integración tecnológica. En este contexto, el presente proyecto busca aportar una solución que combine bajo costo, modularidad y conectividad en la nube, contribuyendo al desarrollo de sistemas más accesibles y escalables para la agricultura urbana.

Más allá de la revisión de antecedentes, este proyecto se justifica en varios niveles:

- **Académico y científico:** aporta al campo de la agricultura inteligente mediante la integración de IoT y servicios en la nube de AWS, generando un prototipo que puede servir como base para nuevas investigaciones, publicaciones y proyectos de innovación tecnológica.
- **Social:** contribuye a mejorar la seguridad alimentaria en comunidades urbanas al facilitar la producción de alimentos frescos en hogares y espacios reducidos, además de fortalecer la educación ambiental y el uso responsable de los recursos.

- **Económico:** busca ofrecer una solución modular y de bajo costo que reduzca la dependencia de alimentos externos, disminuyendo el precio final de los productos.
- **Ambiental:** fomenta la sostenibilidad mediante el uso eficiente de agua y energía, reduciendo la huella de carbono asociada al transporte de alimentos y alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2, ODS 11 y ODS 12).
- **Institucional:** se alinea con la misión y visión de la Universidad EAN, enfocada en el desarrollo sostenible, la innovación y el emprendimiento, fortaleciendo su compromiso con proyectos que generan impacto positivo en la sociedad.
- **Proyección futura:** el prototipo tiene potencial de escalabilidad, pudiendo adaptarse a modelos comunitarios, comerciales o educativos, además de abrir la posibilidad de integrar energías renovables o algoritmos de inteligencia artificial para el análisis predictivo de cultivos.

Metodología

El desarrollo del presente proyecto se abordó mediante un enfoque de ingeniería aplicada, orientado al diseño, implementación y validación de un sistema mecatrónico para un invernadero inteligente compacto. La metodología integra el análisis de requerimientos, la evaluación de alternativas tecnológicas, el diseño del sistema y la construcción de un prototipo funcional, con el fin de validar su desempeño en condiciones reales.

Diseño del sistema

El sistema propuesto se estructura bajo una arquitectura mecatrónica compuesta por tres niveles: adquisición de datos, procesamiento y control, y comunicación en la nube.

En el nivel de adquisición, se emplean sensores para medir variables ambientales críticas como temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y luminosidad. Estos dispositivos permiten obtener información en tiempo real sobre las condiciones internas del invernadero.

El nivel de procesamiento está basado en un microcontrolador con conectividad WiFi (ESP32), encargado de interpretar los datos capturados y ejecutar las acciones de control correspondientes. En este nivel se implementan algoritmos que determinan la activación de los actuadores en función de umbrales previamente definidos.

Finalmente, el nivel de comunicación permite la transmisión de datos hacia la nube mediante servicios de Amazon Web Services (AWS), específicamente AWS IoT Core. Esta integración posibilita el almacenamiento, visualización y monitoreo remoto de la información a través de dispositivos móviles.

Requerimientos Del Sistema

Requerimientos Funcionales

El sistema fue diseñado para cumplir con las siguientes funcionalidades principales:

- Monitoreo ambiental en tiempo real de variables como temperatura, humedad relativa y luminosidad, mediante la adquisición continua de datos en intervalos regulares.
- Control automatizado de variables, permitiendo activar o desactivar el sistema de riego en función de la humedad del suelo, la ventilación según la temperatura interna y la iluminación artificial cuando las condiciones de luz natural sean insuficientes.
- Conectividad y almacenamiento de datos, mediante el envío de la información a la nube utilizando un microcontrolador con conectividad WiFi, y su almacenamiento en servicios como AWS IoT Core y bases de datos para su posterior análisis.

- Interfaz de usuario para la visualización de datos en tiempo real, incluyendo históricos y gráficos de comportamiento ambiental.
- Generación de notificaciones automáticas (opcional), en caso de que las variables excedan los límites establecidos.

Requerimientos No Funcionales

El sistema también fue diseñado considerando criterios de desempeño y calidad:

- Eficiencia energética, mediante el uso de sensores y actuadores de bajo consumo.
- Bajo costo, priorizando componentes accesibles en el mercado colombiano.
- Escalabilidad, permitiendo la integración futura de nuevos sensores o tecnologías complementarias.
- Usabilidad, mediante interfaces intuitivas para usuarios sin conocimientos técnicos avanzados.
- Fiabilidad, garantizando la estabilidad en la comunicación entre dispositivos y la nube.
- Mantenimiento sencillo, facilitando la sustitución de componentes en caso de fallo.

Análisis De Restricciones

Durante el desarrollo del prototipo se identificaron diversas limitaciones que influyen en su implementación:

Desde el punto de vista económico, el presupuesto restringido obligó a utilizar componentes de bajo costo, lo cual puede afectar la precisión y durabilidad del sistema. En el ámbito técnico, la dependencia de la conectividad WiFi representa un factor crítico para la transmisión de datos en tiempo real.

Adicionalmente, el carácter compacto del invernadero limita su capacidad de simulación a pequeña escala, lo que condiciona los resultados a entornos domésticos. El tiempo disponible para el desarrollo del proyecto también restringió la cantidad de pruebas experimentales realizadas.

Finalmente, la necesidad de conocimientos técnicos en programación, electrónica y computación en la nube representa una barrera potencial para la adopción del sistema por parte de usuarios no especializados.

Selección De Alternativas

Para el desarrollo del sistema se evaluaron diferentes alternativas tecnológicas orientadas a la automatización agrícola en espacios reducidos.

En primer lugar, se consideró un sistema de riego automático independiente, el cual presenta ventajas en términos de bajo costo y facilidad de implementación, pero limita significativamente las capacidades de monitoreo y análisis de datos.

En segundo lugar, se evaluó un sistema con almacenamiento local de datos, el cual permite registrar información ambiental sin necesidad de conexión a internet. No obstante, esta alternativa no ofrece monitoreo en tiempo real ni acceso remoto a la información.

Finalmente, se seleccionó la implementación de un invernadero inteligente con conexión a la nube mediante AWS, debido a su capacidad para integrar monitoreo, control automatizado y análisis de datos en tiempo real. A pesar de requerir mayor conocimiento técnico y conectividad estable, esta alternativa representa la solución más completa, escalable y alineada con los objetivos del proyecto.

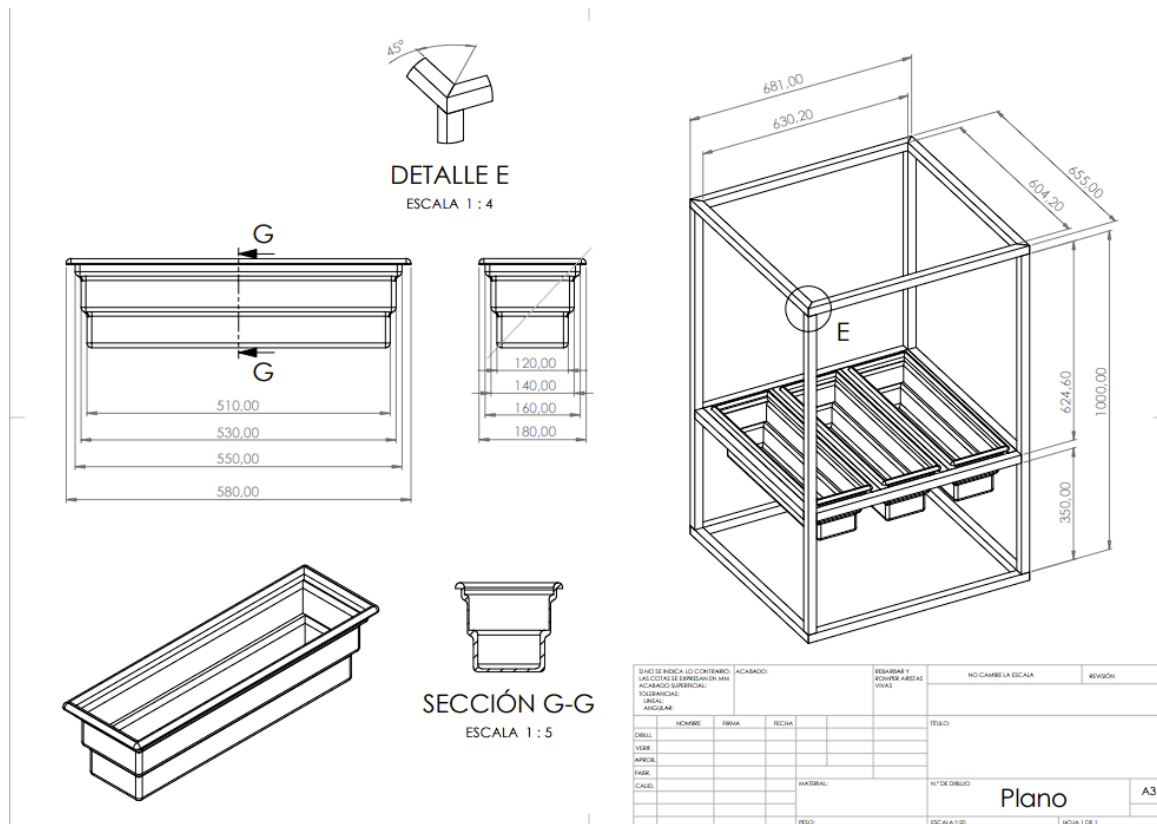
Procedimiento De Implementación

El desarrollo del prototipo se llevó a cabo en varias etapas:

1. Inicialmente, se realizó el diseño estructural del sistema mediante herramientas CAD (SolidWorks), lo que permitió definir dimensiones, materiales y distribución de los componentes (figura 1).
2. Posteriormente, se construyó la estructura física del invernadero utilizando materiales como metal, madera y acrílico, integrando elementos de movilidad como ruedas para facilitar su uso en entornos domésticos (figura 2).
3. En la fase de integración, se instalaron los sensores y actuadores encargados del control de riego, ventilación e iluminación. Estos dispositivos fueron conectados al microcontrolador, el cual fue programado para ejecutar las funciones de control automático (figura 3).
4. Seguidamente, se configuró la comunicación con la nube mediante AWS IoT Core, permitiendo la transmisión de datos y su visualización en interfaces remotas. (figura 4).
5. Finalmente, se realizaron pruebas de validación del sistema, incluyendo la siembra de cultivos (lechuga) y el monitoreo de su crecimiento durante un periodo determinado, evidenciando el correcto funcionamiento del prototipo. objetivos del proyecto. (figura 5).

Figura 1

Primera etapa, plano inicial de prototipo desarrollado en SolidWorks.



Nota. Se comenzó consiguiendo unas materas comerciales, para su fácil reemplazo en caso de daño, luego se comenzó con el diseño CAD del prototipo en Solid Works, para tener un plano de referencia antes de comenzar con la construcción, además de tener claro los materiales necesarios para la misma. Elaboración propia.

Figura 2

Segunda etapa de construcción de prototipo.



Nota. Se procedió a cortar y soldar los tubos como se había planeado anteriormente, luego se soldaron unos travesaños con ángulos, x distantes para que las materas encajaran de forma correcta a la altura especificada por el plano. Elaboración propia.

Figura 3

Tercera etapa de construcción de prototipo.



Nota. Se procedió con la instalación de las ruedas para su fácil movilización, madera y acrílico para garantizar un espacio ideal para las plantas y una estética amigable. Elaboración propia.

Figura 4

Cuarta etapa de construcción de prototipo.



Nota. Se procedió a rellenar las materias con un filtro de grava, carbón y arena antes de la tierra para garantizar un óptimo drenaje y salud de las plantas. Elaboración propia.

Figura 5

Quinta etapa de construcción de prototipo.



Nota. En el siguiente paso, se agregaron las luces y los actuadores para el control de riego, ventilación y sus respectivos sensores. Elaboración propia.

Figura 6

Sexta etapa de construcción de prototipo.



Nota. En el último paso se sembraron las de lechuga para comprobar que el prototipo realmente funciona, evidenciándose a los 15 días un crecimiento significativo. Elaboración propia.

Análisis De Sostenibilidad

El proyecto se fundamenta en principios de sostenibilidad en tres dimensiones:

1. Desde el enfoque ambiental, el sistema permite optimizar el uso de recursos como el agua y la energía mediante el control automatizado de variables, reduciendo el desperdicio y la huella de carbono asociada a la producción de alimentos.
2. En el ámbito económico, la propuesta se basa en un diseño de bajo costo y fácil implementación, lo que facilita su acceso a usuarios en entornos urbanos y genera ahorros a largo plazo en el consumo de recursos.
3. Desde la perspectiva social, el proyecto promueve la seguridad alimentaria y el aprovechamiento de espacios urbanos no productivos, además de servir como herramienta educativa para la enseñanza de tecnologías sostenibles y agricultura inteligente.

Discusión De Resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el prototipo desarrollado cumple con los requerimientos funcionales planteados, particularmente en el monitoreo y control automatizado de variables ambientales. La adquisición continua de datos y la respuesta de los actuadores ante cambios en las condiciones del entorno confirman la viabilidad de implementar sistemas de agricultura inteligente en entornos urbanos a pequeña escala. Este comportamiento es consistente con estudios previos que destacan la efectividad de los sistemas IoT en la automatización agrícola y el control de variables críticas de cultivo (Shamshiri et al., 2020; Bholane et al., 2021).

La integración con servicios en la nube mediante AWS permitió la visualización y almacenamiento de datos en tiempo real, lo que representa una mejora significativa frente a soluciones tradicionales con procesamiento local. Esta capacidad de monitoreo remoto y gestión de información coincide con lo reportado en la literatura reciente, donde se resalta el papel de la computación en la nube en la escalabilidad y eficiencia de sistemas agrícolas inteligentes (Alam & Mohanty, 2021; Zhang et al., 2022). Asimismo, la arquitectura implementada demuestra ser compatible con tendencias actuales como la digitalización agrícola y el uso de plataformas distribuidas para el análisis de datos (Khan et al., 2024).

No obstante, durante la validación del sistema se identificaron limitaciones asociadas principalmente a la dependencia de la conectividad WiFi, lo cual puede afectar la continuidad del monitoreo en tiempo real en entornos con infraestructura de red inestable. Esta problemática ha sido ampliamente documentada en estudios recientes, donde se señala la conectividad como uno de los principales desafíos para la adopción de soluciones IoT en agricultura (Farooq et al., 2020; Raja et al., 2023).

Adicionalmente, el uso de sensores de bajo costo, aunque alineado con el objetivo de accesibilidad económica del proyecto, puede introducir variaciones en la precisión de las mediciones. Esta situación refleja el compromiso existente entre costo y desempeño en sistemas de agricultura inteligente, aspecto que ha sido identificado como una limitación común en implementaciones a pequeña escala (Khan et al., 2024).

A pesar de estas limitaciones, el sistema presenta un alto potencial de mejora y escalabilidad. La arquitectura modular implementada permite la integración futura de nuevos sensores, así como la incorporación de técnicas avanzadas de análisis de datos, como modelos predictivos o gemelos digitales, los cuales han demostrado ser efectivos en la optimización de procesos agrícolas (Subahi, 2024).

En términos generales, los resultados obtenidos validan la viabilidad técnica del prototipo y su aplicabilidad en entornos urbanos, posicionándolo como una solución prometedora para la agricultura inteligente en espacios reducidos. Estos hallazgos refuerzan la importancia de desarrollar tecnologías accesibles, eficientes y sostenibles que faciliten la adopción de prácticas agrícolas innovadoras en contextos urbanos.

Conclusiones

El desarrollo del invernadero inteligente compacto permitió demostrar la viabilidad de integrar tecnologías de Internet de las Cosas, automatización y computación en la nube en una solución orientada a la agricultura urbana en espacios reducidos.

El sistema implementado logró optimizar el uso de recursos como el agua y la energía, mediante el control automatizado de variables ambientales, contribuyendo a mejorar las condiciones de cultivo y reduciendo la intervención humana directa.

Asimismo, la integración con servicios en la nube de AWS permitió habilitar el monitoreo remoto en tiempo real, lo cual representa un avance significativo frente a soluciones tradicionales, facilitando el acceso a la información y la toma de decisiones.

No obstante, se identificaron desafíos relacionados con la estabilidad de la conectividad y la precisión de los sensores, los cuales deben ser abordados en futuras mejoras del sistema.

Finalmente, el proyecto constituye una base sólida para el desarrollo de soluciones escalables y sostenibles en agricultura urbana, con potencial de integración de tecnologías emergentes como inteligencia artificial y energías renovables.

Referencias

- Alam, M. M., & Mohanty, S. P. (2021). Smart agriculture systems using IoT and cloud computing. *IEEE Cloud Computing*, 8(1), 26–33.
- Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: A summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), 277–283. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>
- Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: Vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- Bholane, P. P., Bholane, R. M., & Deshmukh, A. V. (2021). Smart greenhouse automation using IoT and cloud computing. *Materials Today: Proceedings*, 46(20), 9636–9640.
- Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2020). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(5), 3743–3758. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296>

- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B. (2020). Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics*, 9(2), 319.
<https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- García, J., & López, M. (2022). Uso de IoT y computación en la nube para la agricultura inteligente. *Revista de Ingeniería*, 45(2), 55–68.
- Khan, R., Rehman, A., Zafar, S., & Khan, M. A. (2024). Internet of Things (IoT)-based smart greenhouse monitoring and control system: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, 108564.
- Mekala, M. S., & Viswanathan, P. (2017). A novel technology for smart agriculture based on IoT with cloud computing. In *2017 International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud (I-SMAC)* (pp. 75–82). IEEE. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2017.8058360>
- Raja, R., Nguyen, T. T., & Nguyen, T. H. (2023). IoT-based smart agriculture monitoring systems: A review of architectures and technologies. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 37, 100857.
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2020). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 106–120. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- Subahi, A. F. (2024). Smart greenhouse monitoring and control system using IoT and digital twin technology. *IEEE Access*, 12, 14523–14537.

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>

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, L. (2022). Smart agriculture systems based on IoT and cloud computing: A systematic review. *Sensors*, 22(12), 4567.