

Monitoreo de invernaderos usando tecnologías IOT

(agosto de 2024)

Daniel Alberto Cruz Porras, Ing. Mecatrónico, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia, daniel.cruz01@ustabuca.edu.co

Directora - Deisy Carolina Páez Casas, Ing. Electrónica, Facultad de Ingenierías, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, deisy.paez@ustabuca.edu.co

Resumen - En el ámbito de la agricultura de precisión, los invernaderos desempeñan un papel esencial al permitir la producción controlada de cultivos en ambientes protegidos. Sin embargo, el seguimiento continuo y preciso de las condiciones ambientales dentro de los invernaderos sigue siendo un desafío. La necesidad de mantener parámetros como temperatura, humedad, niveles de luz y calidad del suelo en rangos óptimos para el crecimiento de los cultivos es crucial para asegurar cosechas de alta calidad y rendimientos eficientes.

La aplicación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) se postula como una alternativa prometedora para abordar este desafío al proporcionar una solución potencial para el monitoreo y control efectivo de las condiciones ambientales en invernaderos. No obstante, la implementación exitosa de sistemas de monitoreo de invernaderos basados en IoT plantea desafíos técnicos y específicos que requieren un análisis.

Por ello, el presente artículo busca proporcionar una visión completa y detallada de los aspectos más relevantes de la agricultura en invernaderos y su monitoreo mediante tecnologías IoT, sus pros y contras, así como avances y tendencias durante los últimos años; para ello se hace revisión del tema desde los aspectos básicos en la construcción de invernaderos, pasando por un análisis de las tendencias existentes en el campo y llegando a la revisión de diferentes escenarios en que se han implementado soluciones con tecnologías IoT para la agricultura, permitiendo así identificar patrones, desafíos y líneas de mejora.

Conceptos Clave: *Internet de las cosas (IoT), Invernadero, Monitoreo, Control, Sensor, Protocolo, Variables Agrometeorológicas.*

Abstract - In the field of precision agriculture, greenhouses play a crucial role by enabling controlled crop production in protected environments. However, continuous and accurate monitoring of environmental conditions within greenhouses remains a challenge. Maintaining parameters such as temperature, humidity, light levels, and soil quality within optimal ranges for crop growth is essential to ensure high-quality harvests and efficient yields.

The application of Internet of Things (IoT) technologies is emerging as a promising alternative to address this challenge by providing a potential solution for effective monitoring and control of environmental conditions in greenhouses. Nonetheless, the successful implementation of IoT-based greenhouse monitoring systems poses specific technical challenges that require analysis.

Therefore, this article aims to provide a comprehensive and detailed overview of the most relevant aspects of greenhouse agriculture and its monitoring using IoT technologies, including their pros and cons, as well as recent advancements and trends. To this end, the article reviews the topic from the basic aspects of greenhouse construction, through an analysis of existing trends in the field, and concludes with an examination of different scenarios where IoT solutions have been implemented in agriculture, allowing for the identification of patterns, challenges, and areas for improvement.

Key Concepts: *Internet of Things (IoT), Greenhouse, Monitoring, Control, Environmental, Sensor, Protocol, Agrometeorological Variables.*

I. Introducción

En los últimos años, hemos sido testigos de avances extraordinarios en diversos sectores impulsados por la innovación tecnológica [1,2,3]. Sin embargo, es fundamental asegurar que la agricultura no quede rezagada en esta era de transformación digital, pues la creciente población e industrialización, así como el cambio climático están reduciendo año tras año las tierras cultivables [4,5], además la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) alerta de la necesidad de tierras de cultivo y agua por el aumento de la población, ya que según sus predicciones, la producción mundial de cultivos tendrá que duplicarse para 2050 [6]. En este contexto, la implementación de tecnologías como Internet de las Cosas (IoT) se presenta como una oportunidad única para modernizar y optimizar la producción agrícola [7], especialmente en el contexto de los invernaderos, ya que estos permiten obtener producción fuera de época o en lugares con condiciones climáticas adversas [8,9].

Los invernaderos desempeñan un papel crucial en la

agricultura al permitir la producción controlada de cultivos en ambientes protegidos [8,9]. Sin embargo, el monitoreo continuo y preciso de las condiciones ambientales dentro de estos espacios son las bases para un uso óptimo de recursos; mantener parámetros como temperatura, humedad, niveles de luz y calidad del suelo en rangos ideales es esencial para garantizar cosechas de alta calidad y rendimientos eficientes [10].

En respuesta a esta necesidad, la aplicación de tecnologías IoT ofrece una perspectiva prometedora. Estas tecnologías permiten el monitoreo en tiempo real y el control efectivo de las condiciones ambientales dentro de los invernaderos, lo que puede mejorar significativamente la gestión de los cultivos y optimizar la producción agrícola [11].

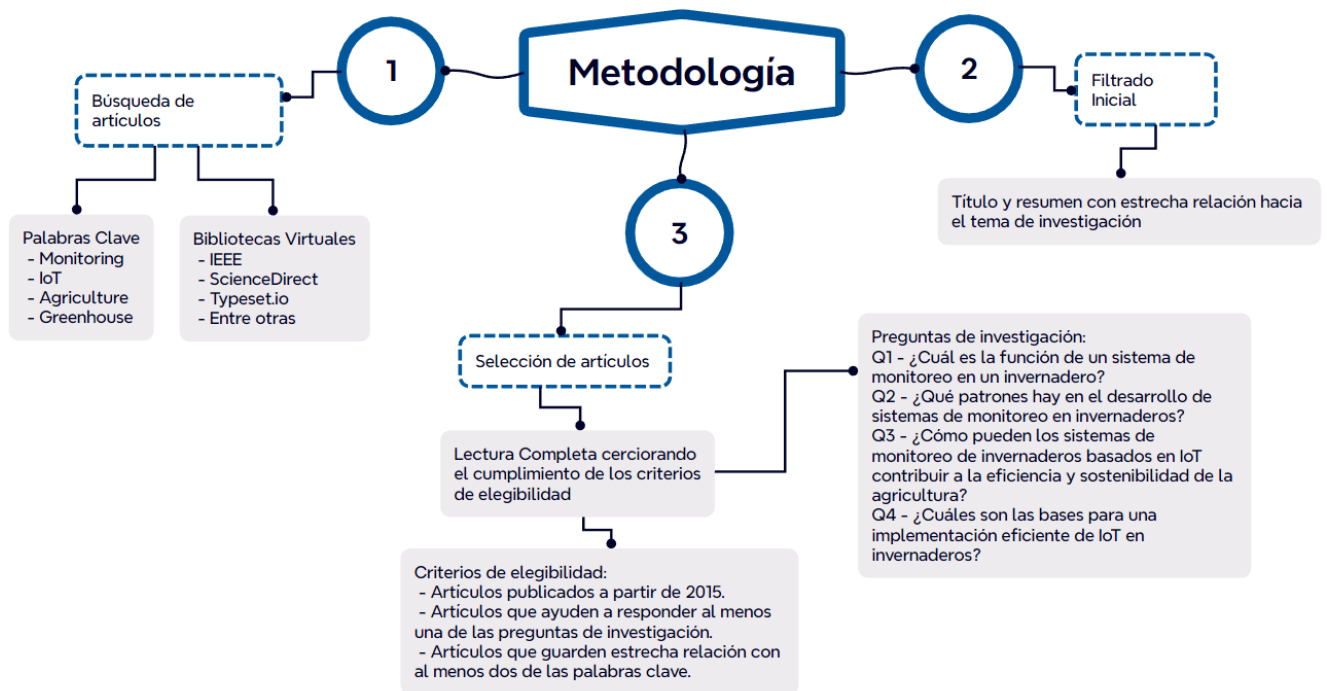
El presente artículo busca proporcionar una vista panorámica sobre el estado de la aplicación de IoT en invernaderos. Para ello se realizó la revisión del estado del arte en cuanto a la

aplicación de dispositivos IoT en invernaderos. Se abordaron los aspectos fundamentales en la construcción de invernaderos, reconociendo la importancia de considerar estos aspectos desde la perspectiva de la aplicación de IoT para el monitoreo. Por ejemplo, el posicionamiento del invernadero respecto a las ráfagas de viento que inciden en su estructura, el volumen y la frecuencia de las precipitaciones, y la cantidad y horas de luz solar recibida por distintos tipos de invernaderos según su diseño.

Además, se analizan las soluciones propuestas para el monitoreo y control de invernaderos mediante el uso de tecnologías IoT, destacando sus ventajas y limitaciones, proporcionando una visión general e informada sobre los avances más recientes en este campo, así como identificando puntos de mejora.

I.I Metodología

Figura 1. Estructura de la metodología



Para la revisión sistemática de la literatura (SLR - por sus siglas en inglés) se llevó a cabo la búsqueda de artículos con información relevante mediante el uso de palabras clave tales como “Monitoring”, “IoT”, “Agriculture” y “Greenhouse”; este procedimiento se realizó en múltiples bibliotecas virtuales como IEEE, ScienceDirect, Typeset.io, entre otras. Inicialmente los artículos se filtraron por título y resumen, cuidando que estos tuvieran estrecha relación con el tema de investigación; posterior a este filtro, se eligieron los artículos que, tras su lectura, mostraran información relevante y alineada con las preguntas de investigación, siendo estos aquellos que presentasen una o varias características como:

aplicaciones agrícolas de invernadero basadas en IoT para monitoreo, seguimiento y detección; permitieran identificar desafíos y posibles líneas de investigación o mejora; señalaran puntos clave para la implementación de IoT en invernaderos.

Preguntas de investigación:

Las preguntas de investigación cumplen un papel importante en la revisión sistemática de la literatura, ya que actúan como una guía estructurada para la selección y análisis de los artículos. Estas preguntas están diseñadas para enfocar la investigación en áreas específicas de interés, asegurando que cada artículo seleccionado

contribuya de manera significativa al entendimiento y avance del tema en estudio.

Q1 - ¿Cuál es la función de un sistema de monitoreo en un invernadero?

Q2 - ¿Qué patrones hay en el desarrollo de sistemas de monitoreo en invernaderos?

Q3 - ¿Cómo pueden los sistemas de monitoreo de invernaderos basados en IoT contribuir a la eficiencia y sostenibilidad de la agricultura?

Q4 - ¿Cuáles son las bases para una implementación eficiente de IoT en invernaderos?

Criterios de elegibilidad:

La definición de criterios de elegibilidad es un paso crucial, ya que permite filtrar y seleccionar los artículos más relevantes y útiles para la investigación. En este caso, la "población" se refiere al conjunto inicial de artículos que contienen términos o palabras clave relacionados con la agricultura en invernaderos y el monitoreo mediante tecnologías IoT. Sin embargo, no todos los artículos dentro de esta población resultan igualmente valiosos o pertinentes para los objetivos específicos del estudio.

Criterios utilizados:

- Artículos publicados a partir de 2015: Este criterio asegura que la información sea relativamente reciente y refleje los avances más actualizados en el campo de estudio. Las tecnologías IoT y su aplicación en agricultura evolucionan rápidamente, por lo que limitar la búsqueda a publicaciones recientes garantiza la relevancia y vigencia de los datos.
- Artículos que aporten información para responder al menos una de las preguntas de investigación: Las preguntas de investigación establecidas inicialmente definen los objetivos y el alcance del estudio. Por lo tanto, es fundamental que los artículos seleccionados aporten información que contribuya a responder al menos una de estas preguntas, asegurando así su relevancia directa para el tema de investigación.
- Artículos que guarden estrecha relación con al menos dos de las palabras clave: Las palabras clave representan los conceptos fundamentales del estudio. Al exigir que los artículos estén estrechamente relacionados con al menos dos de estas palabras clave, se garantiza que aborden los temas centrales de interés, como invernaderos, monitoreo, IoT, entre otros, evitando la inclusión de artículos demasiado tangenciales o desviados del enfoque principal.

Estos criterios de elegibilidad actúan como un filtro riguroso, permitiendo seleccionar únicamente los artículos más pertinentes y enriquecedores para la investigación. Al aplicar estos criterios, se asegura que la revisión sistemática de la literatura se base en información actualizada, directamente relevante para las preguntas de investigación y estrechamente alineada con los conceptos clave del estudio.

II. Aspectos básicos constructivos de invernaderos [12]

Dentro de los factores que inciden en el control del microclima en un invernadero, se podrían mencionar el aire o la ventilación, la radiación solar y la humedad como aspectos generales; estas son variables que se pueden manejar mediante los aspectos constructivos de un invernadero, lo cual facilitará las tareas de monitoreo y/o control en etapas posteriores.

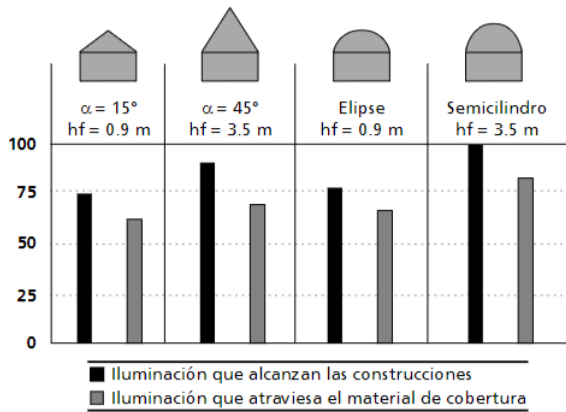
Aspectos constructivos relevantes:

- *Elección de la cubierta [13,14]*, pues la transmisión de la radiación solar a través de ésta afecta tanto el balance energético como la actividad fotosintética de los cultivos. La radiación terrestre de onda larga (radiación infrarroja o "térmica"), con un rango de longitud de onda de 5 a 40 μm , es importante para estudiar el balance energético y la pérdida de calor nocturno en el invernadero. Por otra parte, la radiación fotosintéticamente activa (PAR), con un rango de longitud de onda de 0.4 a 0.7 μm , es crucial para optimizar el desarrollo y el rendimiento de los cultivos; estudios han demostrado que incluso un aumento del 1% en la radiación PAR puede conducir a un aumento del 1% en los rendimientos del tomate [13].

La cantidad de radiación que alcanza la estructura de un invernadero difiere de la radiación que logra ingresar al mismo, ya que las propiedades de la cubierta afectan su transmitancia [Trm]. Por lo tanto, seleccionar una cubierta que permita el paso adecuado de la radiación PAR y regule eficientemente el balance energético dentro del invernadero adquiere importancia.

- *Forma y ángulo del techo [13,14,15]*, éste factor afecta tanto la temperatura como la transmisión de radiación ya que está directamente relacionado con la radiación recibida por el invernadero; este es un factor que afecta principalmente en latitudes alejadas del ecuador ya que la incidencia de los rayos del sol con el techo varía; lo óptimo para la transmitancia de radiación PAR es que haya una perpendicularidad entre el techo y los rayos de luz incidentes pues al llegar a ángulos cercanos a los 45° se encuentran pérdidas de transmitancia significativas. Entre los factores que afectan la cantidad de radiación que ingresa al invernadero, está la cantidad de radiación incidente sobre su estructura; dicha radiación incidente puede incrementarse al seleccionar una determinada forma para el techo del invernadero, tal como se muestra en la Figura 2, donde se observa la iluminación de un invernadero en función de la forma de su techo.

Figura 2. Cantidad de luz en función de la forma del techo (Tomada de [15])

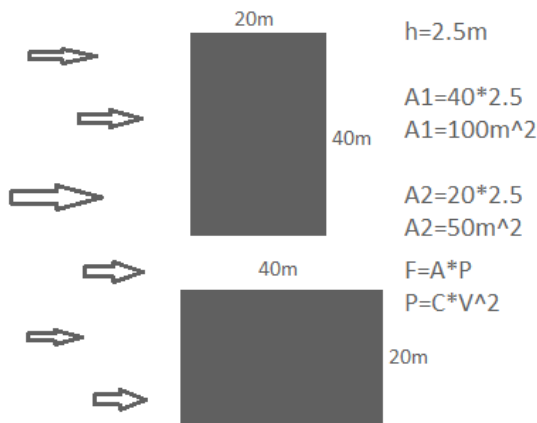


- **Orientación del invernadero [13,14]**, éste factor toma mayor relevancia en situaciones en que los vientos alcanzan altas velocidades o la disponibilidad de luz es baja; para el caso de ráfagas de viento de alta velocidad se recomienda orientar el invernadero de forma longitudinal en sentido del viento, además de implementar cortinas corta vientos, estas pueden ser naturales (barreras de árboles) o artificiales; lo que se busca al orientar el invernadero en el sentido del viento, es minimizar la fuerza que ejerce el viento sobre el invernadero, esto se logra reduciendo el área del invernadero que se opone al movimiento del viento, tal como se ejemplifica en la figura 3.

Sea:

- h – altura del invernadero
- F – fuerza del viento
- A – área
- P – presión del viento
- C – coeficiente de arrastre
- V – velocidad del viento

Figura 3. Ejemplo de orientación de una estructura.

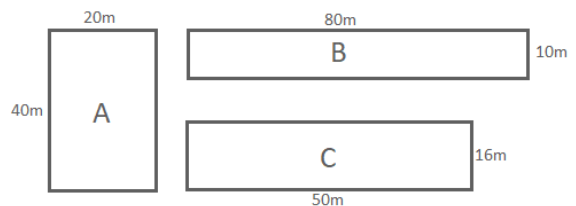


- **Tamaño y forma de canaletas [14,17]**, este factor adquiere valor por la necesidad de mantener un sistema asilado y manejable, ya que, de no calcular correctamente el tamaño, inclinación o forma de las

canaletas, pueden surgir problemas de acumulación o rupturas que afectarían el intercambio de calor entre el interior y el exterior del invernadero, así como la humedad dentro del mismo, dificultando el manejo preciso de las variables de interés.

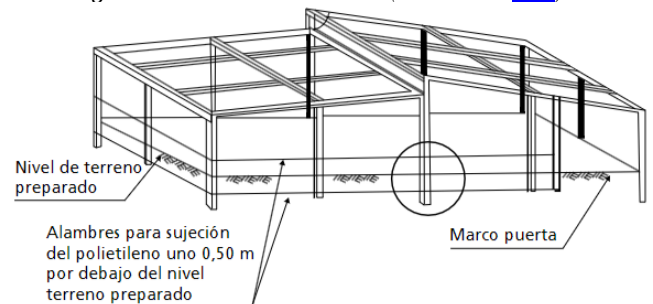
- **Dimensiones del invernadero [13,15]**, para cubrir una determinada área se pueden usar diferentes dimensiones X*Y, esto se debe tener en cuenta pues en conjunto con la altura determina la superficie del invernadero, por tanto, al optimizar las dimensiones del invernadero se reduce el área de contacto con el exterior y así mismo la pérdida de calor.

Figura 4. Ejemplo de posibles dimensiones para cubrir un área de 800 m²



- **Zócalo [13,17]**, esta es una medida de protección para situaciones en las que haya riesgo de heladas pues protege del aire frío que se concentra a ras del suelo por la noche y que puede tener impactos graves en los cultivos, este va enterrado en una pequeña zanja y sube hasta unos 80 cm arriba del suelo, tal como se observa en la figura 5.

Figura 5. Colocación del zócalo (Tomado de [17])



III. Resultados SLR

En esta sección se presenta una síntesis de la revisión sistemática de la literatura (SLR) realizada sobre la aplicación de tecnologías IoT en invernaderos. La sección incluye una tabla que resume la información más relevante de cada artículo

revisado, así como tablas y gráficas adicionales que permiten un mejor análisis de los datos recopilados. Para cada artículo revisado, se proporciona la siguiente información:

- *Año de publicación:* Indica el año en que fue publicado el artículo.
- *Título del artículo:* Proporciona el título completo del artículo revisado.
- *Breve descripción:* Ofrece una descripción concisa del contenido y enfoque del artículo.
- *Dominio:* Clasifica el artículo según su enfoque principal, ya sea en la construcción, monitoreo y/o control de invernaderos.
- *Variables medidas o controladas:* Especifica las variables que se midieron o controlaron en el estudio, pudiendo ser variables de observación (como altura de las plantas, ancho de hojas, dosel, etc) o variables agrometeorológicas (tales como temperatura, humedad, niveles de luz, entre otras).
- *Protocolos usados:* Indica los protocolos de comunicación utilizados en la implementación de sistemas IoT en cada uno de los artículos, como MQTT, LoRaWAN, Zigbee, entre otros.

La figura 6 en conjunto con cada uno de los gráficos expuestos en esta sección proporcionan una herramienta valiosa para identificar rápidamente las características y contribuciones clave de cada artículo, facilitando la comparación y el análisis crítico de las soluciones propuestas en el campo del monitoreo y control de invernaderos mediante tecnologías IoT.

Figura 6. Revisión Sistemática de la Literatura

Systematic Literature Review Survey						
Referencia	Año Publicación	Artículo	Descripción	Dominio	Variables	Protocolos
[12]	2019	Invernaderos Tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino	Este documento analiza los diversos factores constructivos de invernaderos y su impacto en los mismos, yendo desde su forma hasta los materiales.	Aspectos constructivos/ Diseño	NA	NA
[18]	2019	Design of the Facility Vegetable Environment Monitor System of Greenhouse Based on Internet of Things	Se propone un marco de cultivo en invernadero IoT para el monitoreo de los parámetros ambientales que influyen en el crecimiento de vegetales.	Monitoreo	CO2, temperatura ambiente, luz y humedad relativa	ZigBee
[19]	2018	Intelligent Greenhouse Clean Energy Control Integrating Multi-Granularity Internet of Things	Se desarrolla un sistema de monitoreo y control para la evaluación de variables de invernadero.	Monitoreo y Control	Luz, humedad relativa y temperatura ambiente	WiFi, MQTT, WSN
[20]	2023	Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0	Se implementaron tecnologías IoT para el monitoreo de invernaderos con cultivos de tomate, cebolla y cilantro.	Monitoreo	Luz, humedad relativa y temperatura ambiente	LoRaWAN, HTTP
[21]	2020	Green house based on IoT and AI for societal benefit	Se desarrolla un sistema automatizado de invernadero basado en IoT e IA. Incorpora predicción del clima y algoritmos de aprendizaje automático para optimizar el uso del agua basado en las necesidades de las plantas.	Monitoreo y Control	Temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del suelo y lluvia	WiFi
[22]	2021	An automated irrigation system for optimized greenhouse using IoT	Se implementaron tecnologías IoT para el monitoreo de invernaderos y la automatización de su sistema de riego.	Monitoreo y Control	Humedad relativa	WSN
[23]	2022	Vertical farming: A potencial farming practice for lettuce production	Se analiza y compara el crecimiento de plantas de lechuga en agricultura vertical vs agricultura horizontal.	Monitoreo y Seguimiento	Luz, altura, dosel y peso	NA

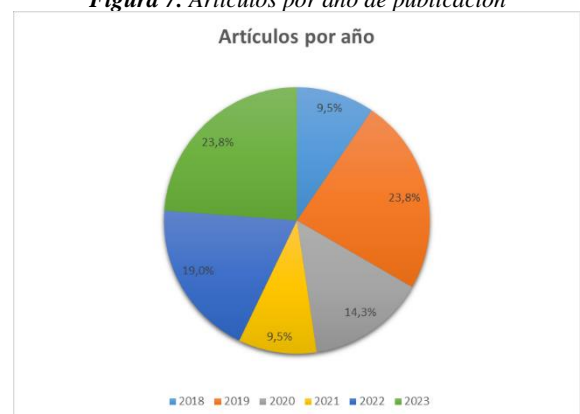
[24]	2023	Design of a Samall-Scale Hidroponic System for Indoor Farming of Leafy Vegetables	Se describe el diseño y la implementación de un sistema hidropónico a pequeña escala basado en IoT para el cultivo de vegetales en interiores. El sistema utiliza materiales y sensores de bajo costo para permitir el monitoreo y automatización del proceso de cultivo.	Monitoreo y Control	Temperatura y humedad ambiente, pH, temperatura y conductividad eléctrica de la solución nutritiva	IoT (no especifica protocolos exactos)
[25]	2019	Monitoreo de variables agrometeorológicas en la fase de germinación de un cultivo de pimentón a través de IoT	Se desarrolló un sistema de monitoreo para la etapa de germinación de un cultivo de Pimentón.	Monitoreo	Luz, humedad relativa, humedad del suelo y temperatura ambiente	IEEE 802.11g(WiFi), HTTP
[26]	2018	Precision Agriculture Design Method Using a Distributed Computing Architecture on Internet of Things Context	Se propone un método de diseño para la agricultura de precisión usando una arquitectura de computación distribuida. Se analiza los paradigmas de edge y fog computing en aplicaciones agrícolas automatizadas, buscando el desarrollo de sistemas inteligentes adaptados a sus necesidades específicas.	Diseño, Monitoreo y Control	Temperatura del suelo, temperatura ambiente, conductividad del agua de riego, pH del suelo y pH del agua de riego	MQTT, HTTP, WiFi
[27]	2023	Internet of Things based Sensor System for Vertical Farming and Controlled Enviroment Agriculture	Se desarrolló un prototipo de un sistema de sensores para monitoreo en sistemas de agricultura vertical.	Monitoreo	Humedad del suelo	MQTT, LoRaWAN
[28]	2023	Monitoring and Controlling Hydroponic Units Using IoT	Se discute el uso de IoT para monitorear y controlar sistemas hidropónicos. Además, analiza las ventajas del IoT en la agricultura hidropónica y los desafíos potenciales.	Monitoreo y Control	pH de la solución nutritiva, temperatura ambiente, humedad relativa, nivel de agua y nivel de nutrientes	WiFi, MQTT
[29]	2022	Smart Greenhouse and Agriculture 4.0	Se desarrolló e implementó un sistema de monitoreo para variables agrometeorológicas dentro y fuera de un invernadero.	Monitoreo	Temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento	MQTT
[30]	2022	Use of Tower System in Vertical Farming Technique	Se implementó y analizó un sistema de torres para cultivo vertical incluyendo variables de observación.	Monitoreo, Control y Seguimiento	Temperatura ambiente, humedad relativa, altura de la planta, número de hojas y ancho de hojas	NE
[31]	2021	Sistem Pemantau Kondisi Lingkungan Pertanian Tanaman Pangan dengan NodeMCU ESP8266 dan Raspberry Pi Berbasis IoT	Se presenta un sistema de monitoreo ambiental basado en IoT para la agricultura de precisión. Utiliza sensores para recopilar datos que se transmiten a una Raspberry Pi y posteriormente se muestran en tiempo real en una aplicación web y móvil.	Monitoreo	Temperatura ambiente, humedad relativa, temperatura del suelo, humedad del suelo y luz	MQTT, WiFi

[32]	2022	Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar	Se analiza el desarrollo y la importancia de los invernaderos inteligentes en Qatar. Además, se examinan las tecnologías innovadoras y las estrategias de gestión sostenible aplicadas en invernaderos.	Monitoreo y Control	Temperatura ambiente, humedad relativa, pH, luz y CO2	ZigBee, WSN, Bluetooth, WiFi
[33]	2019	Development of a Simplified Smart Agriculture System for Small-scale Greenhouse Farming	Se desarrolló un sistema simplificado de agricultura inteligente utilizando dispositivos de bajo costo para monitorear el microclima y gestionar el cultivo en invernaderos de tomate a pequeña escala.	Monitoreo y Control	Temperatura ambiente, humedad relativa, CO2 y presión barométrica	WiFi, Bluetooth
[34]	2023	Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)	Se desarrolló e implementó un prototipo de Iluminación LED para el control total de la luz en cultivos en interiores, este con ciclos de luz y oscuridad.	Control	Luz	NE
[35]	2020	Smart Green House Monitoring based on IOT	Se presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo para invernaderos inteligentes basado en Internet de las Cosas (IoT). Utilizando Cisco Packet Tracer, se simula y verifica el invernadero inteligente.	Diseño	Temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del suelo y CO2	NA
[36]	2020	An IoT Based Smart Farming System Using Machine Learning	Se realizó diseño y pruebas sobre un sistema de agricultura inteligente con capacidades de predicción mediante técnicas de inteligencia artificial.	Monitoreo y Control	Nivel y flujo de agua, humedad del suelo, humedad relativa, temperatura ambiente y luz	MQTT, WiFi
[37]	2019	Remote Monitoring and Control System for Greenhouse Based on IoT	Se desarrolla e implementa un sistema de control y monitoreo para invernadero basado en IoT con puesta en marcha de un prototipo.	Monitoreo y Control	CO2, temperatura ambiente, luz y humedad relativa	Zigbee

Para garantizar que la revisión sistemática de la literatura refleje el estado actual y presente datos relevantes sobre el monitoreo de invernaderos mediante tecnologías IoT, es esencial garantizar que los artículos analizados sean vigentes, para ello se tomaron en cuenta solo aquellos artículos que hubiesen sido publicados a partir del año 2015. Este enfoque permite identificar avances tecnológicos, cambios en metodologías, direcciones de innovación y nuevas aplicaciones que puedan haber surgido.

La revisión de artículos recientes proporciona una base sólida para comprender el estado de la tecnología y los desafíos contemporáneos que enfrenta la implementación de sistemas IoT en la agricultura. Además, nos permite detectar patrones y correlaciones con el desarrollo de nuevas tecnologías, la evolución de las necesidades agrícolas y las respuestas a los desafíos ambientales.

Figura 7. Artículos por año de publicación

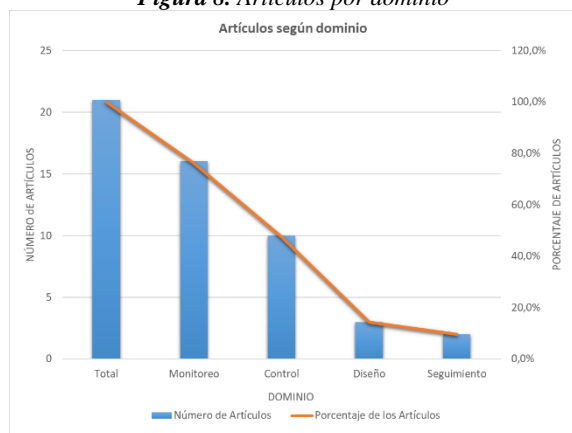


En la figura 7, se presenta la distribución porcentual de los artículos revisados según su año de publicación. El gráfico circular muestra los datos en orden cronológico y en sentido horario para todos los artículos de la revisión sistemática de la literatura, los cuales fueron publicados en un lapso de seis años, comprendido entre 2018 y 2023; con un vistazo a este, se observa que hay 3 años que

representan un alto porcentaje de la revisión de la literatura, siendo estos el 2023 (23,8%), el 2019 (23,8%) y el 2022 (19%), que en conjunto representan el 66,6% de la revisión.

Para ahondar en la información proporcionada por la figura 6, se reorganiza la misma dentro de gráficos que permitan su visualización de forma eficaz, obteniendo así los gráficos mostrados en las figuras 8, 9 y 10; la figura 8 presenta la cantidad y porcentaje de artículos que hacen parte en cada grupo de dominio (Monitoreo, Control, Diseño y Seguimiento); la figura 9, organiza los artículos según los protocolos que implementan, y finalmente la figura 10, muestra cuántos artículos hicieron monitoreo o control de cada una de las variables agrometeorológicas que aparecen en la SLR.

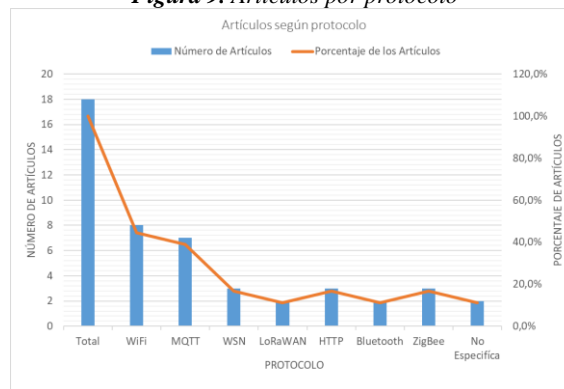
Figura 8. Artículos por dominio



La figura 8 presenta la distribución de los artículos según su dominio. Las categorías de dominio consideradas son Monitoreo, Control, Seguimiento, Diseño y Total, esta última categoría representa el 100% de artículos revisados, proporcionando así una referencia visual clara. Es importante señalar que un único artículo puede pertenecer a varias categorías, lo que implica que la suma de artículos en todas las categorías excederá el total de artículos revisados, análisis que sería inválido y carente de sentido. Las barras azules muestran el número de artículos en cada categoría, mientras que la línea naranja indica el porcentaje que representan respecto al total de artículos revisados.

El análisis de este gráfico revela que la mayor parte de los artículos se centra en el monitoreo (con 16 artículos o 76,2%), seguido del control (con 10 artículos o 47,6%), lo que refleja una tendencia significativa y bastante presente sobre la implementación de sistemas de monitoreo y control en invernaderos. El diseño y el seguimiento, por otro lado, están menos representados, con 3 y 2 artículos respectivamente, lo que sugiere que estos aspectos son menos abordados en la literatura reciente o que son considerados como componentes de menor prioridad en comparación con el monitoreo y el control.

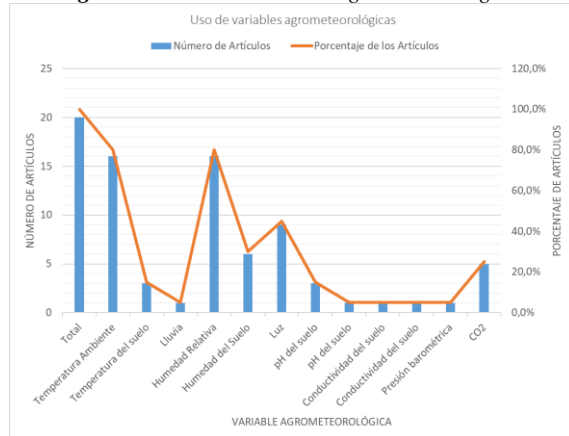
Figura 9. Artículos por protocolo



La figura 9 ilustra la distribución de los artículos revisados según los protocolos de comunicación utilizados en los sistemas de monitoreo y/o control. Debido a la naturaleza del análisis no todos los artículos revisados son aplicables, por ello y tal como se observa en el gráfico, el total de artículos en este análisis es de 18; esto se debe a que 3 de los artículos se centran exclusivamente en diseño y por ello solo llegan a simular un escenario sin llegar a pruebas prácticas. Este análisis permite identificar las tendencias y preferencias en la selección de protocolos de comunicación en la literatura reciente sobre el tema.

Al revisar este gráfico es fácil identificar la predominancia de protocolos WiFi (con 8 artículos o 44,4%) así como del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) (con 7 artículos o 38,9%), sin embargo, es de señalar que WiFi no es un único protocolo, sino una familia de estándares que engloba múltiples protocolos específicos (basados en el estándar IEEE 802.11), esto podría explicar su prominencia, ya que diferentes implementaciones de WiFi pueden ser utilizadas en diversos contextos de monitoreo de invernaderos; por otra parte, MQTT se presenta con amplio margen como el protocolo más implementado, este protocolo es conocido por su eficiencia en redes con ancho de banda limitado y su capacidad para manejar múltiples dispositivos con baja latencia y alta confiabilidad. Su diseño ligero y su enfoque en la conectividad máquina a máquina (M2M) lo hacen ideal para aplicaciones IoT, donde los recursos pueden ser limitados.

Los protocolos restantes (WSN (*Wireless Sensor Network*), LoRaWAN, HTTP, Bluetooth y ZigBee) aparecen con una frecuencia muy similar entre sí, teniendo un 14,46% de aparición promedio; WSN tampoco es un único protocolo, sino que engloba diferentes protocolos específicos como podrían ser ZigBee, IEE 802.15.4, entre otros, estos protocolos suelen ser eficientes en términos de consumo energético, así como poseer características de autoconfiguración y escalabilidad, lo que facilita su implementación en entornos agrícolas. Finalmente se encuentran 2 artículos (11,1%) en los que no se especifica el protocolo de comunicación utilizado, lo que podría indicar un enfoque más general o la falta de detalles en la descripción de los sistemas.

Figura 10. Uso de variables agrometeorológicas

El Gráfico 4 muestra la cantidad y el porcentaje de artículos que monitorean y/o controlan cada una de las variables agrometeorológicas encontradas durante la revisión de la literatura. En este gráfico, se incluye nuevamente una categoría "Total" para proporcionar una referencia visual clara de la totalidad de los artículos revisados, exceptuando uno que se centra puramente en el diseño estructural de invernaderos y no es aplicable a este análisis. Las barras azules representan el número de artículos que abordan cada variable, mientras que la línea naranja muestra el porcentaje que esos artículos representan respecto al total de artículos aplicados en el análisis.

Al analizar el gráfico, se observa que la temperatura ambiente y la humedad relativa son las variables más comúnmente utilizadas, ambas con 16 artículos, lo que indica la alta prioridad de estas variables en la gestión de invernaderos. La luz, la humedad del suelo y el CO2 también son variables importantes, siendo abordadas en 9, 6 y 5 artículos respectivamente; la aparición de la variable "Luz" en tercer lugar, en conjunto con los datos hallados en la revisión de la literatura, la postula también como una variable muy a tener en cuenta, ya que al controlarla completamente se pueden tener cultivos completamente aislados de luz natural [12,34]

Este análisis nos proporciona una vista clara de las tendencias y enfoques en la investigación y aplicación de IoT en invernaderos. La predominancia de estudios que involucran la temperatura, la luz y la humedad, en conjunto con la información que ha proporcionado la revisión de la literatura, subraya la importancia de estas variables para la optimización del ambiente de crecimiento de los cultivos, mientras que las variables menos abordadas podrían representar áreas potenciales de investigación y desarrollo tecnológico.

IV. Artículos Destacados

En esta sección se desglosará algunos de los artículos más relevantes de la SLR, iniciando con un resumen, seguido de la topología implementada, alguna observación de considerarse pertinente y un breve análisis sobre el mismo

para dar así al lector una mayor claridad sobre los resultados de la investigación e ilustrar algunos puntos de interés.

3.1 Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0 [20]

En este desarrollo se llevó a cabo el monitoreo de invernaderos con cultivo de tomate, cebolla y cilantro de la mano de los agricultores en el corregimiento San Cristóbal, de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia; Los factores clave tenidos en cuenta para la selección de los invernaderos en los cuales se iba a trabajar fueron, la disposición del agricultor en cuestión a la innovación, el historial del agricultor como persona responsable en el cuidado de sus invernaderos y finalmente la ubicación de los invernaderos para buscar línea directa y libre de comunicación entre los nodos y la puerta de enlace.

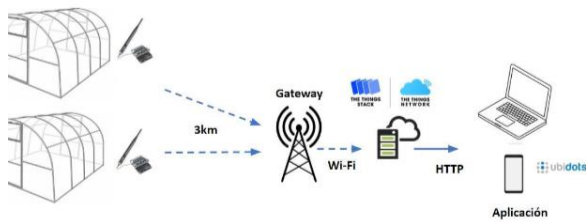
En este estudio, así como en la mayoría se resalta la importancia de tener el mejor control posible de las variables del invernadero para lograr los objetivos que se buscan con la implementación de un invernadero bajo el uso de IoT, como lo son:

- Promover el desarrollo de las plantas para mejorar la producción.
- Lograr producción fuera de temporada o bajo condiciones adversas.
- Prevenir plagas y enfermedades, reduciendo así el uso de pesticidas u otros agentes.
- Optimizar el uso de materiales como agua, fertilizantes, pesticidas e incluso el tiempo.

Las variables que se determinaron medir fueron la humedad relativa, la temperatura y la luz, para lo cual escogieron como sensor de humedad y temperatura el sensor SHT10 que es resistente a condiciones adversas y tiene mediciones precisas y como sensor de luz el Si1145 que percibe la luz en el espectro de 0.55 μm a 1 μm . La alimentación de cada nodo se hace mediante el conjunto de una batería LiPo (litio-polímero), un panel solar monocristalino de 2 W y un cargador solar Li-Po.

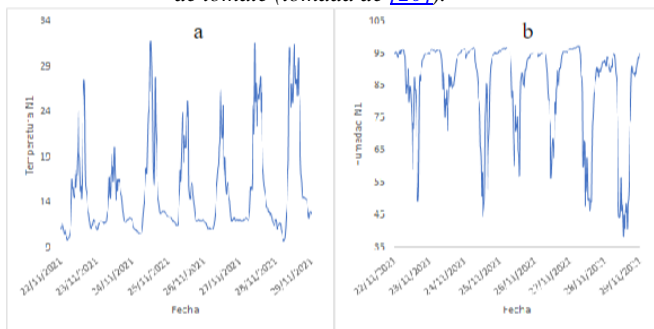
Arquitectura; La transmisión de los datos se hace por medio de antenas compatibles con el protocolo LoRaWAN, protocolo mediante el cual se hace el envío de datos hacia la puerta de enlace, que en este caso es un Dragino DLOS8 con soporte multicanal, este envía los datos a la plataforma The Things Network (TTN), plataforma que permite usar de forma gratuita la conexión a una puerta de enlace, tener una "aplicación" (proyecto) y un máximo de diez dispositivos dentro del proyecto, dado que esta plataforma no proporciona de ninguna forma permanencia de datos hicieron la integración por medio del protocolo HTTP con el aplicativo Ubidots, donde se almacena y se visualiza la información.

Figura 11. Topología de red (Tomado de [20])



Resultados; Se logró el adecuado monitoreo de los 2 invernaderos, obteniendo las variaciones de la temperatura, humedad relativa y luminosidad para cada uno de los invernaderos, con variaciones entre 10°C y 35°C para la temperatura y de 30% a 97% para la humedad relativa; En cuanto a la actividad lumínica se observaron ciclos normales (día y noche), donde la mayor luminosidad alcanzada fue cerca de los 980 lux para luz del tipo PAR.

Figura 12. Temperatura y Humedad Relativa de invernadero de tomate (tomada de [20]).



Análisis; Se nota la correlación natural que existe entre la temperatura y la humedad relativa, donde al subir la temperatura baja la humedad relativa y viceversa, esto se observa fácilmente por medio de las gráficas, en donde aparecen picos crecientes de temperatura y a su vez de forma inversa, aparecen picos decrecientes de humedad relativa; De estas gráficas también podemos observar que al no aplicar un control de las variables, a pesar de encontrarnos dentro de un invernadero, las variables fluctúan en rangos bastante amplios, al menos comparados con los rangos recomendados de temperatura y humedad relativa para cultivos como el del tomate, cuyos rangos recomendados son de 13°C a 16°C para temperatura nocturna, de 22°C a 26°C para temperatura diurna y de 55% a 60% de humedad relativa [13], esto nos muestra que en efecto hay un amplio margen de mejora en el cultivo de invernadero, ya sea con monitoreo para realizar seguimiento y toma de decisiones en base a criterio y datos o para ir un paso más allá y buscar la aplicación tecnológicas para el control de variables.

3.2 Monitoreo Pimentón Huila [25]

En este trabajo se realizó el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de bajo costo para la etapa de germinación de un cultivo de pimentón bajo cubierta en Pereira, Colombia.

Las variables monitoreadas en este trabajo fueron, la

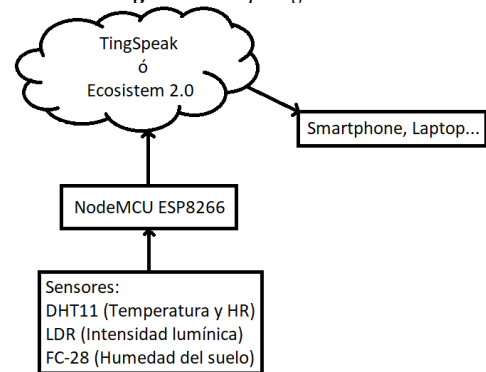
temperatura, la humedad relativa, la intensidad lumínica y la humedad del suelo, variables que se midieron con el uso de los sensores listados a continuación:

- Sensor DHT11, para la medición de temperatura y humedad relativa del ambiente.
- Sensor LDR para la intensidad lumínica.
- Sensor FC-28 para la humedad del suelo.

La elección de estos sensores se realizó buscando obtener un “kit” compacto de bajo costo y con características de fácil portabilidad, ya que el trabajo fue orientado a germinadores y es en específico un desarrollo más orientado a la investigación.

Arquitectura; Los datos recolectados por los sensores se envían por conexión serial a un NodeMCU ESP8266 que posteriormente envía los datos a la nube usando el protocolo IEEE 802.11g (comunicación Wi-Fi), en la nube encontramos la plataforma ThingSpeak, que es un servicio de Mathworks (Creadores de Matlab y Simulink) que usa el protocolo Hyper Text Transfer Protocol (HTTP), y la app Ecosistem 2.0, que fue desarrollada como segunda alternativa y para mayor facilidad de visualización.

Figura 13. Topología de red



Resultados; Se hizo la medición de las variables y se plasmaron en gráficas para una fácil supervisión, obteniendo como resultados temperaturas entre los 29°C y los 30°C (Figura 14); datos de humedad ambiente que van desde ~57.5% hasta ~64% (Figura 15); Intensidad del sol creciente a partir de la puesta en marcha y una humedad del suelo con comportamiento muy estable.

Figura 14. Temperatura (tomada de [25]).

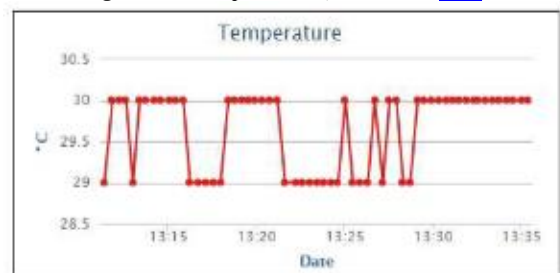


Figura 15. Humedad ambiente (tomada de [25]).



Observación; Con las gráficas proporcionadas en el artículo no es fácil establecer una correlación entre las variables medidas, sin embargo se podría decir que hay una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la humedad, aunque es probable que al tener disponibles en las gráficas tan solo los datos de aproximadamente media hora (como se ve en las figuras 13 y 14) no se logre determinar una tendencia clara de comportamiento, además, en los datos iniciales de intensidad lumínica y humedad del suelo se hace notar un extraño comportamiento, probablemente debido a la puesta en marcha.

Análisis; A diferencia del monitoreo en cultivos como tal, en el monitoreo de germinadores es de especial importancia monitorear la humedad del suelo, ya que es una variable crítica en esta etapa del desarrollo de las plantas y en la mayoría de los casos mantener un riego constante en esta etapa es esencial [38,39], por lo que la implementación de tecnologías IoT en germinadores representa una gran oportunidad de mejora, ya que el tiempo y atención requeridos suele ser muy alto; Además, en países como Colombia, dónde cultivos que requieren germinadores (Café, arroz, otros) para su producción se encuentran tan extendidos y hay una demanda muy alta del mismo, salta a la vista esta oportunidad de mejora.

3.3 Smart Greenhouse and Agriculture 4.0 [29]

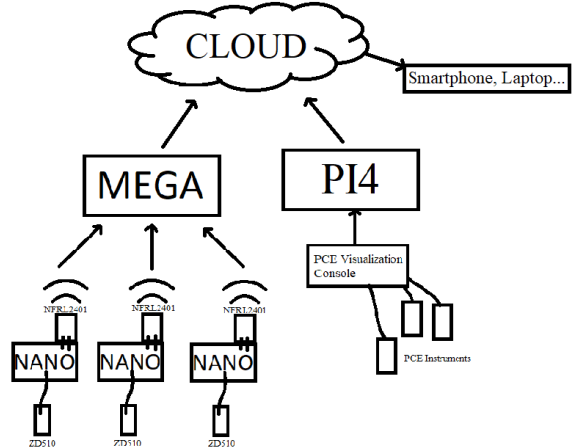
En este trabajo se implementó un sistema de monitoreo de variables y control de riego para invernadero mediante el uso de tecnología IoT, para ello se construyó un invernadero de 42 m² en la ciudad de Cartago, Valle del Cauca, Colombia; este invernadero tenía en su interior cuatro “camas de siembra” de las cuales se midió humedad del suelo con un sensor capacitivo ZD510 en cada una, además se usaron sensores PCE para medir la temperatura y humedad ambiente dentro del invernadero y una estación climática PCE-FWS 20N para medir temperatura, humedad, presión absoluta y relativa, velocidad y dirección del viento fuera del invernadero. Los datos se enviaron usando el protocolo MQTT a la base de datos en la plataforma EMQX para facilitar su uso e implementar visualización desde cualquier dispositivo.

Para el control de riego del invernadero se dispuso de dos bombas y cuatro válvulas solenoides, elementos de los cuales se hacía registro de activación o desactivación, así como iluminación individual en cada cama de siembra mediante bombillas LED de 40 Watts.

Arquitectura; Cada uno de los tres sensores ZD510 se

conectó de forma independiente a una placa Arduino Nano en conjunto con una placa de comunicación NFRL2401 que permitió el envío de datos de forma inalámbrica a una unidad central de procesamiento basada en una placa Arduino Mega, en paralelo se encontraban los diferentes instrumentos PCE conectados a su consola de visualización que enviaba los datos a una placa Raspberry PI4; Estas dos placas, la Arduino Mega y la Raspberry PI4 se conectaron a internet gracias al punto de acceso proporcionado por el TL-WA5210G CPE TP-LINK que fue necesario para dar un acceso a internet en el lugar del invernadero.

Figura 16. Topología de red



Resultados; Se logró un sistema de monitoreo dentro y fuera del invernadero, así como la persistencia de datos; se desarrolló una aplicación web para posibilitar el control de riego del invernadero de forma remota, así como un panel de control físico en el invernadero para control manual.

Figura 17. Temperatura y Humedad Relativa fuera del invernadero (Tomado de [29])

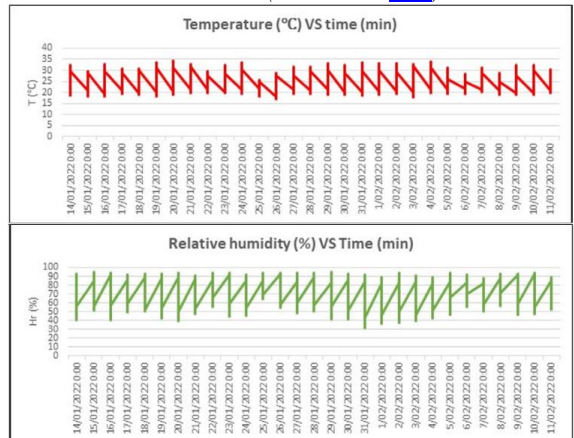
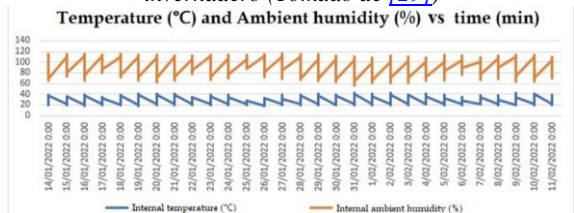


Figura 18. Temperatura y Humedad Ambiente dentro del invernadero (Tomado de [29])



Análisis; En este trabajo se observa nuevamente la relación inversa entre la temperatura y la humedad, tanto en la gráfica de los datos dentro del invernadero como en los datos de fuera del invernadero; de estos datos también podemos hacer contraste sobre las diferencias entre los datos de dentro versus los datos de fuera del invernadero, donde se observa mayor estabilidad tanto en la temperatura como en la humedad, siendo esto más notable en la humedad, ya que esta fluctúa entre ~40% y ~95% fuera del invernadero y entre ~65% y ~115% dentro de este; en la temperatura ocurría algo similar, pues esta se mantuvo en niveles levemente superiores (3°C a 5°C); con este análisis podemos ver como la humedad supera el 100%, punto a partir del cual el agua comienza a condensar, situación que puede afectar de manera negativa los cultivos, por ello es necesario tomar acciones o automatizar algunas medidas en función de los datos obtenidos.

3.4 Use of Tower System in Vertical Farming Technique [30]

En este artículo de la SLR se analiza la implementación de una técnica de cultivo vertical, utilizando un sistema de torres para cultivar plantas de Col China. El método de cultivo en cuestión implica el uso de tuberías de PVC para la construcción de estructuras de ocho torres, torres con 26 orificios cada una, y un sistema de riego con una bomba de agua para cada estructura. Las variables medidas en el estudio incluyen temperatura y humedad relativa (HR), además de variables de observación como la altura de la planta, número de hojas, largo de las hojas y ancho de las hojas. Para medir la temperatura y la humedad se utiliza el sensor DHT22 y las mediciones se toman diariamente de 08:00 a 16:00 GMT (Greenwich Mean Time) durante un período de 21 días; Además, la medición de las variables de observación se realiza cada tres días para seguir el crecimiento y desarrollo de las plantas de Col China.

En el artículo en cuestión también se realiza un análisis de datos para obtener información estadística a partir de los datos de observación (figura 22). En general, el artículo tiene como objetivo explorar la eficacia del sistema de torres en el cultivo vertical y su impacto en el crecimiento de plantas de Col China.

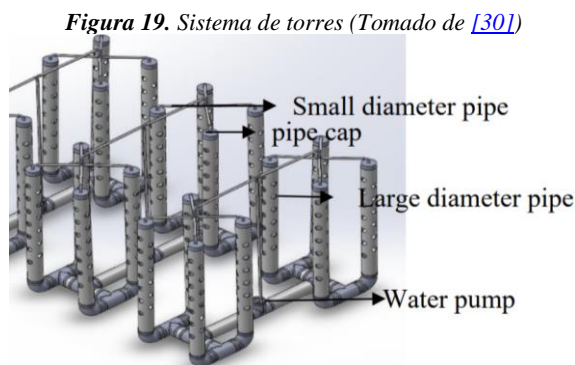
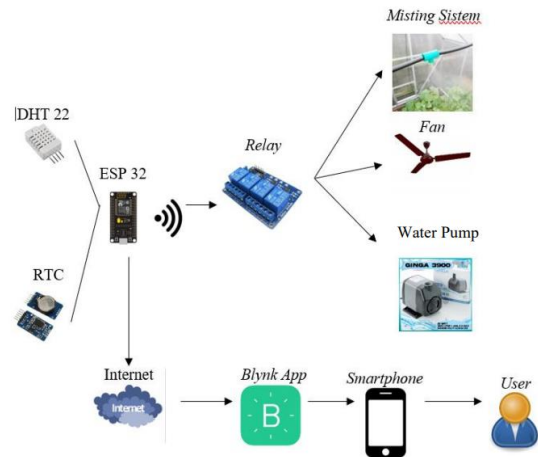


Figura 19. Sistema de torres (Tomado de [30])

Arquitectura; En el trabajo en cuestión se usó un ESP 32 Series como controlador principal conectado a Internet. El

sistema incorpora múltiples sensores DHT22 para detección de temperatura y humedad, así como una tarjeta RTC DS3231 para una medición precisa del tiempo. El microcontrolador envía los datos a la nube y procesa las lecturas para activar las salidas, incluidos nebulizadores, ventiladores, redes de sombra y bombas de agua de forma automática.

Figura 20. Arquitectura de red (Tomado de [30])



Resultados; Se obtuvo la producción exitosa de 624 plantas de Col China utilizando el sistema de torre vertical hecha de tubería de PVC. Se desarrolló el sistema de torres que está equipado con un sistema de riego que consta de una Bomba de Agua para suplir el riego de ocho torres, además, el sistema de monitoreo utilizado en la técnica de cultivo vertical controló eficazmente la temperatura y la humedad, evitando que la temperatura sobrepasara excesivamente el “Set Point” y en cuanto a humedad evitando que descendiese en exceso, lo que dio como resultado la producción de plantas de Col China de buena calidad. Se observó que el crecimiento promedio en el número de hojas hasta la cosecha aumentó de 6 en la primera semana a 16 en el momento de la cosecha. Se encontró que el uso de los métodos de hidroponía es eficaz al hacer observación de variables como el número de hojas, el área foliar y el peso de producción, con unos resultados significativos.

Figura 21. Temperatura (Tomado de [30])

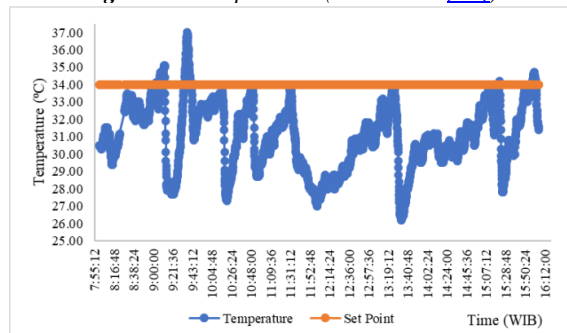
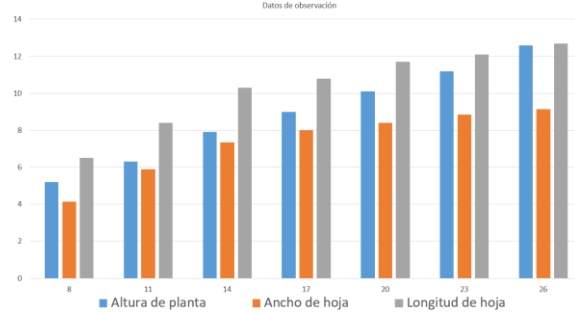


Figura 22. Datos de observación cada 3 días (Adaptado de [30])



Análisis; Este estudio es notable debido a la recopilación de datos de observación y el uso de un sistema de agricultura vertical. Los datos de observación permiten una mejor comprensión del impacto del sistema de monitoreo y control implementado, lo que demuestra que el sistema cumple con su propósito. Sin embargo, al examinar la gráfica de temperatura, se observa que ocasionalmente la temperatura supera el punto de ajuste (set point). A pesar de esto, la intervención del sistema de control es evidente, ya que la temperatura vuelve rápidamente a valores por debajo del punto de ajuste gracias a la acción de control. Además de la eficacia del sistema de control, la productividad y la eficiencia en el uso del espacio son aspectos positivos de la agricultura vertical. Este sistema permite un uso más eficiente del espacio en entornos urbanos, lo cual es crucial dada la limitación de tierras agrícolas disponibles. Sin embargo, estos sistemas también requieren un uso energético constante y una inversión inicial significativa, lo cual puede ser un obstáculo para su implementación.

Una observación adicional es la importancia de la gestión de la información recolectada de los cultivos. El análisis y la interpretación de estos datos pueden llevar a mejoras en el sistema de monitoreo y control, optimizando aún más la productividad y la eficiencia. Este enfoque de agricultura vertical con sistemas de monitoreo y control IoT comparte en muchos casos ventajas y desventajas con invernaderos IoT o sistemas similares como los mencionados germinadores con sistemas de monitoreo.

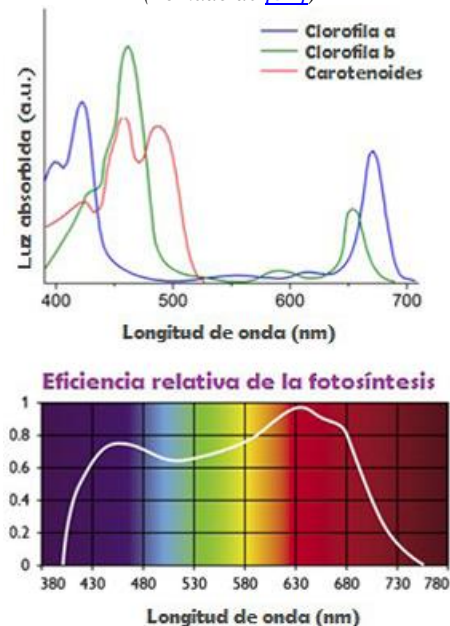
3.5 Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF) [34]

El artículo presenta el desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED diseñado específicamente para cultivos en interiores, dentro del contexto de la agricultura vertical (VF) o agricultura integrada en edificaciones (BIA). Este sistema se enfoca en proporcionar la luz necesaria para el crecimiento saludable de las plantas en un entorno controlado y libre de luz solar, emulando el comportamiento solar con ciclos de luz y oscuridad definidos. El propósito es maximizar el rendimiento de los cultivos mediante el uso eficiente de la energía y la optimización de las condiciones de crecimiento.

El estudio analiza cómo la luz afecta el crecimiento de las plantas, destacando la importancia de las longitudes de

onda específicas. Tal como se observa en la figura 23, las plantas responden de manera óptima a la luz en los rangos de 400-500 nm (luz azul) y 600-700 nm (luz roja), por lo que la luz que se encuentra dentro de estos rangos es esencial para los procesos fotoquímicos. La luz azul es crucial para el desarrollo vegetativo, mientras que la luz roja influye significativamente en la floración y fructificación. El sistema desarrollado utiliza LEDs que emiten en estos rangos para proporcionar la calidad de luz necesaria, mejorando así la eficiencia fotosintética y el crecimiento de las plantas.

Figura 23. Fotosíntesis y longitudes de onda efectivas (Tomado de [34])



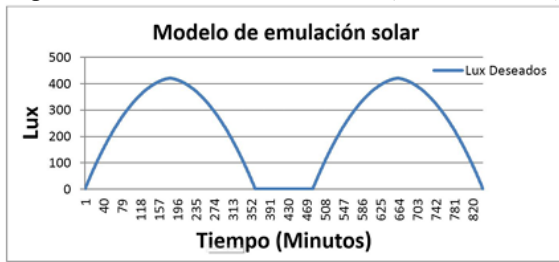
Arquitectura; El sistema de iluminación descrito en el artículo utiliza tecnología LED para simular las condiciones de iluminación solar. Las características principales del sistema incluyen:

- LEDs (Diodos Emisores de Luz): Emiten luz en longitudes de onda específicas que corresponden a los picos de absorción de los procesos fotoquímicos de las plantas. Los rangos principales son de 400-500 nm (luz azul) y 600-700 nm (luz roja), esenciales para la fotosíntesis y el crecimiento.
- Microcontrolador (dsPIC30F4011): Controla la intensidad mediante modulación por ancho de pulso (PWM) y el ciclo de luz, permitiendo la automatización de las fases de iluminación y oscuridad.
- Sensor OPT101: Mide las variaciones en la intensidad lumínica para corroborar el correcto funcionamiento del sistema, así como para tener la posibilidad de ajustarlo según las necesidades del cultivo.

Resultados; Como resultados del artículo en cuestión se encuentra el desarrollo e implementación del sistema de iluminación LED, que funciona bajo un régimen de ciclos de luz de 6 horas y oscuridad de 2 horas, logrando así un

total de 3 ciclos en las 24 horas del día.

Figura 24. Modelo de emulación solar (Tomado de [34])



Esta implementación se llevó a cabo en un prototipo de cultivo vertical durante 15 días de forma ininterrumpida, el prototipo se encontraba completamente aislado de luz solar para lograr corroborar el funcionamiento y efectividad del sistema de iluminación.

Análisis; Estudios como este son interesantes pues la implementación de sistemas de iluminación representa un avance significativo en la agricultura vertical, ya que esta se suele dar en entornos urbanos; Además suplir las necesidades de radiación de los cultivos soluciona múltiples problemas.

Entre las ventajas de sistemas de iluminación como este se encuentra el control preciso que se tiene, permitiendo modificar fácilmente la duración de los ciclos de luz y oscuridad, así como la intensidad en determinados momentos del ciclo, facilitando el estudio del desarrollo de cultivos en función a su exposición a la radiación.

Desventajas pueden ser el costo para implementar sistemas como estos y los conocimientos técnicos requeridos para la instalación y programación de los mismos, especialmente en el contexto de pequeños productores.

V. Hidroponía [40,41]

La hidroponía comparte gran cantidad de similitudes con técnicas de agricultura controladas, como lo son los invernaderos IoT, además, dada la aplicabilidad de ciertas prácticas entre ambas técnicas de agricultura, se opta por dedicar esta sección a su mención.

La hidroponía representa una técnica agrícola moderna que permite el cultivo de plantas sin el uso de tierra o suelo, en su lugar utiliza una solución rica en nutrientes minerales que sostiene el crecimiento de las plantas. Esta técnica es también conocida como agricultura en ambiente controlado debido a que permite optimizar las condiciones de crecimiento, como la luz, la temperatura, la humedad y los nutrientes; Ofreciendo una alternativa eficiente y sostenible frente a la agricultura tradicional, especialmente en zonas con suelos pobres o contaminados, o en áreas urbanas con espacio limitado.

Métodos de Hidroponía; La hidroponía abarca diversas técnicas, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas, adaptándose así a diferentes

necesidades y contextos de cultivo.

- **Técnica de Película de Nutrientes (Nutrient Film Technique, NFT)**
El sistema NFT es uno de los métodos más populares y ampliamente utilizados en la hidroponía. Se basa en el principio de proporcionar una fina lámina de solución nutritiva que fluye continuamente sobre las raíces de las plantas. Este sistema consiste en canales ligeramente inclinados donde las plantas están suspendidas, y la solución nutritiva circula a través de estos canales, asegurando que las raíces tengan acceso constante a los nutrientes y al oxígeno.
- **Sistema de Raíz Flotante**
En el sistema de raíz flotante, las plantas están situadas en bandejas flotantes que descansan sobre la superficie de una solución nutritiva. Las raíces están sumergidas directamente en el líquido, lo que garantiza un suministro constante de nutrientes.
- **Sistema “Ebb and Flow” (Flujo y Reflujo)**
También conocido como Flood and Drain, funciona inundando temporalmente la zona de las raíces de las plantas con una solución nutritiva y luego drenando el exceso de vuelta a un depósito. Este ciclo de inundación y drenaje se repite a intervalos regulares, generalmente controlados por un temporizador.
- **Sistema de Mecha**
El sistema de mecha es una de las formas más sencillas de hidroponía. Utiliza mechas que actúan como intermediarios para transportar la solución nutritiva desde un reservorio hasta las raíces de las plantas. Este sistema es pasivo y no requiere bombas.
- **Sistema Aeropónico**
El sistema aeropónico es una técnica avanzada donde las raíces de las plantas están suspendidas en el aire dentro de un contenedor cerrado y son rociadas periódicamente con una solución nutritiva atomizada. Este método maximiza la exposición de las raíces al oxígeno.
- **Sistema de Goteo**
En el sistema de goteo, una solución nutritiva es goteada lentamente en la zona de la raíz de cada planta a través de un sistema de tuberías y emisores. Este método puede ser de recirculación o no.

La esencia de la hidroponía radica en proporcionar a las plantas todos los nutrientes necesarios directamente a través del agua. Esto elimina la necesidad de suelo y permite un control más preciso sobre el entorno de crecimiento. Los nutrientes esenciales incluyen macro y micronutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, y hierro, entre otros.

VI. Conclusiones

- Se observa que los aspectos constructivos del invernadero pueden afectar en gran medida el manejo de las variables agrometeorológicas, ya que estos aspectos cumplen con aislar el interior del exterior del invernadero e influyen directamente en el intercambio de calor del mismo [12].
- Tras la revisión de la literatura se observa como el protocolo “MQTT” predomina sobre el resto con un 38,9% de aparición siendo el protocolo con mayor tasa de implementación; IEE con 44,4% de implementación es una familia de estándares que engloba múltiples protocolos; La predominancia de MQTT puede deberse a su desempeño en situaciones con recursos limitados, apareciendo con frecuencia en entornos de desarrollo y/o diseño.
- Con base en la información obtenida en la revisión de la literatura, se identifica el frecuente manejo de la temperatura ambiente y la humedad relativa en aplicaciones de invernaderos IoT, contando con un 80% de aparición en artículos cada una, resaltando como variables de gran importancia al momento de controlar un microclima en invernaderos; De este análisis también se observa la relación proporcionalmente inversa que hay entre estas variables [18,19,20...].
- De las técnicas de agricultura en invernadero se identifican aquellas “Vertical Farming” como algunas de las que mejor optimizan el uso de espacio, permitiendo obtener densidades de cultivo de incluso 13,8 veces las obtenidas en técnicas de agricultura horizontal [23].
- El monitoreo y/o control de variables como la humedad del suelo e iluminación, permite optimizar el uso de recursos como el agua, fertilizantes y tiempo al promover el crecimiento y procesos como la fotosíntesis en las plantas de forma intencional, obteniendo así cosechas más abundantes y en menor tiempo y espacio [28,30,32,34].
- Como resultado de la investigación se identifica el desarrollo de sistemas de germinación como un campo en desarrollo que puede verse beneficiado de múltiples enfoques aplicados en invernaderos IoT ya que en ambos escenarios se busca el cuidado de un microclima; el desarrollo de sistemas de germinación en entornos como el colombiano puede verse fuertemente impulsado por la amplia presencia de cultivos que se beneficiarían de ello (Café, arroz, pimentón, entre otros) [25].

REFERENCES

- [1] Ali O., Osmanaj V., Kwiatek P., Alryalat M., Chimhundu, R., & Dwivedi, Y. K. “The impact of technological innovation on marketing: individuals, organizations and environment: a systematic review”. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, vol. 36, no. 3, May 2023, doi: 10.1080/1331677X.2023.2210661.
- [2] Sukumar, S. H., Vargas, A. O., Mondal, S. Y. (2022). “Impact of Technological Innovation on Performance of Manufacturing Firms in Switzerland”. *Journal of Strategic Management*, vol 6, no. 6, pp. 12-21, Oct. 2022, doi: 10.53819/81018102t50119.
- [3] Richard, L., Zimmermann, Stefanie, Seitz. “The Impact of Technological Innovation on Dentistry”. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 14, no. 6, pp. 79-102, Jan. 2023, doi: 10.1007/978-3-031-26462-7_5.
- [4] Noureddine Benkeblia, “Limiting Factors in Agriculture,” in *Mycogroecology*, Elizabeth Gall and Noureddine Benkeblia, Eds., Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2022, pp 51-68.
- [5] Bański, J., Mazur M., “Agricultural Land Use,” in *Transformation of Agricultural Sector in the Central and Eastern Europe after 1989*, Springer, Cham., 2021, pp 43-51.
- [6] Sunil K. Sahu, Huan Liu, “A genetic solution for the global food security crisis,” *Journal of Integrative Plant Biology*, Apr. 2023, doi: 10.1111/jipb.13500
- [7] Gruda, N. (2011, October). “Current and future perspective of growing media in Europe,” in *V Balkan Symposium on Vegetables and Potatoes*, 2011, pp. 37-43.
- [8] Noura Jemai, Meriem Soussi, M.T. Chaibi, “Opportunities for Implementing Closed Greenhouse Systems in Arid Climate Conditions,” *Horticulturae*, vol. 8, no. 12, pp.1102-1102, Dec. 2022, doi: 10.3390/horticulturae8121102
- [9] Xun Li, Xiaohui Hu, Shiwei Song, Da-Wen Sun, “Greenhouse Management for Better Vegetable Quality, Higher Nutrient Use Efficiency, and Healthier Soil,” *Horticulturae*, vol. 8, no. 12, pp. 1192-1192, Dec. 2022, doi: 10.3390/horticulturae8121192
- [10] K. I. Prihan Nimsara, J. Bodaragama, K. A. Roshan Maduwantha and S. D. Fernando, “Energy and Operations Optimization for Effective Greenhouse Management,” presented at the 4th International Conference on Advancements in Computing (ICAC), Colombo, Sri Lanka, 2022, pp. 246-251.
- [11] I.L. López-Cruz, E. Fitz-Rodríguez, R. Salazar-Moreno, A. Rojano-Aguilar and M. Kacira, “Development and analysis of dynamical mathematical models of greenhouse climate: A review”. *Eur.J.Hortic.Sci.*, vol 83, no 5, pp 269-279, Oct. 2018, doi: 10.17660/eJHS.2018/83.5.1
- [12] Mario Lenscak & Norma Iglesias, *Invernaderos: Tecnología Apropiaada en las regiones productivas del Territorio Nacional Argentino (del paralelo 23 al 54)*, Argentina, INTA Ediciones, 2019, ISBN 978-987-8333-21-2.
- [13] Mario Lenscak & Norma Iglesias, “Title of chapter in the book,” in *Invernaderos: Tecnología Apropiaada en las regiones productivas del Territorio Nacional Argentino (del paralelo 23 al 54)*, Argentina, INTA Ediciones, 2019, ch. 2, pp 14-23.
- [14] Mario Lenscak & Norma Iglesias, “Title of chapter in the book,” in *Invernaderos: Tecnología Apropiaada en las regiones productivas del Territorio Nacional Argentino (del paralelo 23 al 54)*, Argentina, INTA Ediciones, 2019, ch. 3, pp 24-30.
- [15] Mario Lenscak & Norma Iglesias, “Title of chapter in the book,” in *Invernaderos: Tecnología Apropiaada en las regiones productivas del Territorio Nacional Argentino (del paralelo 23 al 54)*, Argentina, INTA Ediciones, 2019, ch. 4, pp 31-35.
- [16] Mario Lenscak & Norma Iglesias, “Title of chapter in the book,” in *Invernaderos: Tecnología Apropiaada en las regiones productivas del Territorio Nacional Argentino (del paralelo 23 al 54)*, Argentina, INTA Ediciones, 2019, ch. 5, pp 36-49.
- [17] Mario Lenscak & Norma Iglesias, “Title of chapter in the book,” in *Invernaderos: Tecnología Apropiaada en las regiones productivas del Territorio Nacional Argentino (del paralelo 23 al 54)*, Argentina, INTA Ediciones, 2019, ch. 6, pp 50-73.
- [18] H. Zhao, Y. Cui, F. Yang, R. Yang, D. Pan and L. Zhao, “Design of the Facility Vegetable Environment Monitor System of Greenhouse Based on Internet of Things,” in *2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, 2019, pp. 752-755, doi: 10.1109/WCMEIM48965.2019.00158.
- [19] Shu J., Liu S., & Xu Z., Intelligent Greenhouse Clean Energy Control Integrating Multi-Granularity Internet of Things, in *2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, Jan. 2018, pp. 568-571, doi: 10.1109/ICITBS.2018.00149.
- [20] Arregoces-Guerra, Paulina, Restrepo-Arias, Juan Felipe, Usme Martinez, Manuela, Montoya-Yepes, Juan Pablo, Branch-Bedoya & John Willian, “Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0,” *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol 24, no 2, Aug. 2023, doi: 10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853.

- [21] M. Nargotra and M. J. Khurjekar, "Green house based on IoT and AI for societal benefit," presented in *2020 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, Pune, India, 2020, pp. 109-112, doi: 10.1109/ESCI48226.2020.9167637.
- [22] Seethalakshmi E., Shunmugam M., Pavaiyarkarasi R., Joseph S., & Paulraj J.E., "An automated irrigation system for optimized greenhouse using IoT," in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2021.
- [23] W. Suwimon, K. Nuttapon, P. Tasanee, W. Niwooti, P. Tipsukhon & C. Chatchawan, "Vertical farming: A potential farming practice for lettuce production," in *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2023, vol 83, no 3, pp 248-259, doi: 10.4067/S0718-58392023000300248.
- [24] N. Neiko, A. Atanas, E. Boris, V. Valentin & B. Sorin-Stefan. (2023). "Design of a Small-Scale Hydroponic System for Indoor Farming of Leafy Vegetables," in *Agriculture*, 2023, vol 13, no 6, doi: 10.3390/agriculture13061191.
- [25] A. L. Alvaro. (2019). "Monitoreo de variables agrometeorológicas en la fase de germinación de un cultivo de pimentón a través de IoT," in *Congreso Internacional en Inteligencia Ambiental, Ingeniería de Software y Salud Electrónica y Móvil – AmITIC 2019*, Pereira, Colombia, Aug. 2019
- [26] F. Javier, G. C. Juan, N. H. Mario & M. M. José, "Precision Agriculture Design Method Using a Distributed Computing Architecture on Internet of Things Context," in *Sensors*, 2018, vol 18, no 6, doi: 10.3390/s18061731.
- [27] U. Rahmat, A. Ikram, G. Mark, S. Craig, S. William & W. Colin, (2023). "Internet of Things based Sensor System for Vertical Farming and Controlled Environment Agriculture," in *6th Conference on Cloud and Internet of Things*, Lisbon, Portugal, Apr. 2023, doi: 10.1109/CIoT57267.2023.10084913.
- [28] Prashant Chandrashekhar Nikose and Jayant P. Mehare, "Monitoring and Controlling Hydroponic Units using IoT," *IJFMR*, vol 5, no 3, Jun. 2023, doi 10.36948/ijfmr.2023.v05i03.4167.
- [29] Marín-García E., Torres-Marín J. N. y Chaverra-Lasso A., "Smart Greenhouse and Agriculture 4.0," *Revista Científica*, vol 46, no 1, pp 37-50, doi: 10.14483/23448350.19816.
- [30] R. E. Putri, P. A. Oktavionry, F. Arlius, I. Putri1 & A. Hasan, "Use of Tower System in Vertical Farming Technique," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1182/1/012005.
- [31] Ambarwari A., Dewi Kania Widayawati, & Anung Wahyudi, "Sistem Pemantau Kondisi Lingkungan Pertanian Tanaman Pangan dengan NodeMCU ESP8266 dan Raspberry Pi Berbasis IoT," in *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, 2021, vol 5, no 3, pp 496 – 503, doi: 10.29207/resti.v5i3.3037.
- [32] K. Theodora, A. Yasmine, A. Ouammi & S. Sami, "Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar," in *Environment Systems and Decisions*, 2022, vol 42, no 2, doi: 10.1007/s10669-022-09862-2.
- [33] R. Denis & H. Katsumori & S. Sawahiko. (2019). "Development of a Simplified Smart Agriculture System for Small-scale Greenhouse Farming," in *Sensors and Materials*, 2019, vol 31, no 3, pp 834-843, doi: 10.18494/SAM.2019.2154.
- [34] G. Yesid & L. Eduardo. (2016). "Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF)," in *Informador Técnico*, 2016, vol 80, no 2, doi: 10.23850/22565035.480.
- [35] Rao M., Ajit K. & Kumar G., (2018). "Smart Green House Based on IOT," in *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol 7, no 2.32, pp 258-261, doi: 10.14419/ijet.v7i2.32.15579.
- [36] A. Dahane, R. Benameur, B. Kechar and A. Benyamina, "An IoT Based Smart Farming System Using Machine Learning," in *2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Montreal, QC, Canada, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISNCC49221.2020.9297341.
- [37] Drakulić, U., Mujčić, E. (2020). Remote Monitoring and Control System for Greenhouse Based on IoT, in *Advanced Technologies, Systems, and Applications IV -Proceedings of the International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies (IAT 2019)*, Jul. 2019, doi: 10.1007/978-3-030-24986-1_38.
- [38] Obroucheva N.V., Sinkevich I.A. and Lityagina S.V., "Water relations in germinating seeds," in *Russ J Plant Physiol*, 2017, vol 64, pp 625–633, doi: 10.1134/S102144371703013X.
- [39] O.V. Tkach., V.I. Ovcharuk., O.V. Ovcharuk, and Marcin Jewiarz, "Features of the soil moisture role in ensuring a high yield of root chicory plants," *Podil's'kij visnik: sil's'ke gospodarstvo, tehnika, ekonomika*, 2023, no 36, pp 14-20, doi: 10.37406/2706-9052-2022-12.
- [40] K. Monisha, H. Kalai Selvi, P. Sivanandhini, A. Sona Nachammai, "Hydroponics agriculture as a modern agriculture technique," in *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2023, vol 116, no 1, pp 25-35, doi: 10.5604/01.3001.0016.3395.
- [41] S. Shlomo, R. Victor, K. David & Bar-Tal Asher, "Hydroponic Agriculture and Microbial Safety of Vegetables: Promises, Challenges, and Solutions," in *Horticulturae*, 2023, vol 9, no 1, doi: 10.3390/horticulturae9010051.