

Sistemas de información, zonificación y georreferenciación (agricultura de precisión)

Artículo de investigación científica y tecnológica

# Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0

Greenhouse crop monitoring using 4.0 Technologies

 Paulina Arregoces-Guerra <sup>1\*</sup>  Juan Felipe Restrepo-Arias <sup>1</sup>  Manuela Usme Martinez <sup>1</sup>  
 Juan Pablo Montoya-Yepes <sup>1</sup>  John Willian Branch-Bedoya <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

\*Autor de correspondencia: Paulina Arregoces-Guerra. Universidad Nacional de Colombia, Cra. 65 #59a-110, Robledo, Medellín, Antioquia, Colombia. [parregocesg@unal.edu.co](mailto:parregocesg@unal.edu.co)

Recibido: 30 de noviembre de 2021  
Aprobado: 17 de marzo de 2023  
Publicado: 09 de junio de 2023

Editor temático: Juan Manuel Rodríguez, (Cartografía Temática de Colombia S.A.S. [BioGeomática]Bogotá, Colombia.

Para citar este artículo: Arregoces-Guerra, P., Restrepo-Arias, J. F., Usme Martinez, M., Montoya-Yepes, J. P., & Branch-Bedoya, J. W. (2023). Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2), e2853. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol24\\_num2\\_art:2853](https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2853)

**Resumen:** Implementar las herramientas de la “agricultura inteligente” en Colombia, sobre todo en el dominio de los pequeños agricultores, encuentra serias dificultades. Aunque estos representan un 70,8 % del total de unidades de producción agropecuaria (UPA), según la Encuesta Nacional Agropecuaria (DANE, 2019), solo el 2,4 % de ellos cuenta con una conexión a internet y con el “internet de las cosas” (o *IoT* según sus siglas en inglés) es posible el monitoreo de variables y mejoras de las estrategias de producción agrícola. Dado lo anterior, este trabajo explora el uso de herramientas tecnológicas 4.0 en zonas rurales, donde se utilizó una plataforma *IoT* de acceso libre y tecnologías LoRa y LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), con referencia de arquitectura LoRaFarM (*LoRaWAN-based Smart Farming Modular IoT Architecture*) y también se emplearon sensores en dos invernaderos de producción de hortalizas en el municipio de San Cristóbal. Así, la plataforma permitió a los agricultores la visualización en el panel de control de lecturas de temperatura, humedad relativa del aire, espectros de luz (visible, infrarrojo y ultravioleta) y voltaje de alimentación de los nodos de sensores. La transmisión de datos se configuró a aproximadamente 3 km hasta una puerta de enlace a internet y se logró el almacenamiento de datos hasta por 5 GB. Se concluye que es posible enlazar a agricultores a un nodo de internet, mejorando la cobertura de la asistencia técnica y se propone aumentar las distancias de monitoreo y cubrir un número mayor de agricultores en futuros trabajos.

**Palabras clave:** conectividad, pequeños agricultores, internet de las cosas, agricultura inteligente, sensores.

**Abstract:** Implementing "Smart Agriculture" tools in Colombia, especially in the domain of small farmers, encounters serious difficulties. Although they represent 70,8 % of the total Agricultural Production Units (UPA), according to the National Agricultural Survey (2019), only 2,4 % of the farmers have an internet connection. It is possible to monitor variables and improve agricultural production strategies using "Internet of Things" (IoT). Therefore, this work explores using 4.0 technological tools in rural areas. Based on the LoRaFarM architecture (LoRaWAN-based Smart Farming Modular IoT Architecture), it is used an open-access IoT platform, LoRa, and LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) technologies. That way, nodes are installed in two vegetable production greenhouses in San Cristobal's town. Then, the platform allowed farmers to visualize on a control panel reading of temperature, relative humidity, light spectrum (visible, infrared, and ultraviolet), and the power supply voltage of the sensor nodes. With 5 GB of free data storage, data transmission was configured to approximately 3 km to an internet gateway. In conclusion, it is possible to link farmers to an internet node, improving technical assistance coverage. It is also possible to increase monitoring distances and cover more farmers for future work.

**Keywords:** connectivity, small farmers, Internet of Things, smart farming, sensors.



## Introducción

La producción de alimentos agrícolas es una actividad que depende de diversos factores y las condiciones ambientales juegan un papel fundamental en las temporadas de crecimiento para determinadas especies. Cultivar a la intemperie condiciona al agricultor a tener presente dichas temporadas, a estar atento de los cambios climáticos y a combatir plagas y enfermedades, debido a la continua exposición del cultivo. Así, para un agricultor, contar con un invernadero puede significar una ventaja competitiva a nivel de producción, ya que, según Guo et al. (2020), tener un entorno controlado bajo un invernadero permite:

1. Producir cultivos en cualquier temporada durante más tiempo, asegurando la producción y la demanda alimentaria durante todo el año.
2. Prevenir plagas y enfermedades, reduciendo la cantidad de pesticidas y generando una producción más limpia y de alta calidad.
3. Promover la actividad metabólica de los cultivos, reduciendo el consumo de agua, tierra y fertilizantes.

Lo anterior es posible siempre y cuando se tenga un verdadero control de las variables ambientales al interior del invernadero, lo que supone una supervisión continua durante toda la vida de la cosecha y de los cultivos para conocer su estado, entenderlo y tomar acciones, dependiendo de sus observaciones. Contar con herramientas que les permitan a los agricultores conocer el estado de sus cultivos sin necesidad de estar en campo puede ahorrar un 70 % de su tiempo, además de otros recursos (Ayaz et al., 2019).

El creciente uso de tecnologías de la industria 4.0, como los drones, el internet de las cosas, y la inteligencia artificial en la agricultura (Ayaz et al., 2019), motivan el interés de este trabajo por encontrar herramientas que faciliten su implementación por parte de pequeños agricultores, especialmente en el área de cultivos bajo un invernadero. Entre tanto, el internet de las cosas (*IoT*) ha venido desarrollándose de manera acelerada en los últimos años y ha mostrado el potencial de uso en diferentes áreas de la industria, así como en cultivos de grandes extensiones (Köksal & Tekinerdogan, 2019); “Los elementos que componen un sistema *IoT* son *hardware*/dispositivos, protocolos de comunicación/mensajería e interfaces/servicios” (Mohamad Noor & Hassan, 2019, p. 284). Por ello, los dispositivos, como los sensores inalámbricos, además de recoger múltiple información con gran precisión, permiten vigilar de forma constante los cultivos a largas distancias y las tecnologías de comunicación y los servicios actuales facilitan a un agricultor mantenerse enterado de las condiciones de su cosecha en cualquier momento y lugar.

Con la implementación de tecnologías de *IoT* y mejores estrategias de producción, además de reducir costos, se puede aumentar la productividad de la tierra (Sinha & Dhanalakshmi, 2022). Por otro lado, la manera de implementar los elementos del *IoT* en el contexto de la agricultura inteligente difiere dependiendo de su aplicación y objetivos, es por ello que se han propuesto diferentes arquitecturas que se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Arquitecturas *IoT* para cultivos

Autores	Nombre de arquitectura	<i>Hardware</i> en capa de percepción o física	Protocolos de comunicación inalámbrica	Servicios en capa de aplicación (visualización de datos)	Uso
Triantafyllou et al., 2019	DIAS (Drone Innovation in saffron Agriculture Surveillance)	Sensores aéreos: Dron con cámara térmica, hiperspectral y RGB Sensores en tierra: humedad del aire y del suelo, temperatura, niveles de luminosidad, debilidad de las hojas, pH, velocidad del viento, medición de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo.	LoRaWAN Wifi	App web - plataforma DIAS	Campo abierto, cultivo de azafrán
Codeluppi et al., 2020	LoRaFarM architecture	Sensores: humedad relativa y temperatura del aire, humedad y temperatura del suelo.	Wifi LoRaWAN	App web (dashboard) + app móvil	Campo abierto, invernadero
Ahmed et al., 2018		Sensores: humedad, temperatura, niebla, nubosidad y lluvia.	6LoWPAN	App web	Campo abierto, áreas rurales
Mohammad El-Basioni & Abd El-Kader, 2020	Aitra (Agricultural IoT reference architecture)	Sensores: temperatura y contenido de agua en la tierra.	<i>Gateway</i> local y dispositivos no habilitados para IP	App web	Campo abierto, invernadero
Guillermo et al., 2019	Mocca system (Cacao Monitoring System)	Sensores: humedad del suelo, temperatura y humedad del aire, pH, conductividad eléctrica, luminosidad y consumo de energía.	ZeegBe LoRaWAN	Ionic (para desarrollo móvil y aplicaciones web)	Cultivos de cacao
Ferrández-Pastor et al., 2018	User-Centered Design Models	Sensores riego: tiempo y flujo Sensores tierra: humedad y temperatura del suelo, pH y conductividad eléctrica.	MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	App web (dashboard)	Invernaderos

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1 puede verse cómo los diferentes autores le dieron prioridad al uso de sensores de temperatura y humedad, tanto en el aire como en el suelo, así como de pH y conductividad eléctrica para medir la acidez o el contenido de sales del suelo, debido a los fertilizantes y los pesticidas utilizados. Por otro lado, en la mayoría de las investigaciones se utiliza el protocolo inalámbrico de comunicación LoRaWAN, con el objetivo de transportar variables numéricas a una distancia mayor y, de igual manera, los autores decidieron desarrollar sus plataformas web para la visualización de sus datos. Para elegir las arquitecturas de referencia, se tuvo en cuenta que los estudios presentaran información completa de los protocolos y los dispositivos de *hardware* utilizados en el estudio con varias de sus especificaciones técnicas, así como que fueran replicables con *hardware* asequible y aplicables a cultivos bajo invernadero.

Para la implementación de la plataforma, se tomó como arquitectura de referencia, la propuesta por Triantafyllou et al. (2019), quienes plantean la arquitectura nombrada por ellos mismos: DIAS (*Drone Innovation in saffron Agriculture Surveillance*), la cual se basa en las siete capas del modelo OSI. En esta, la capa física está constituida por los dispositivos finales o nodos de sensores.

- **Sensores terrestres:** medición de humedad y temperatura, luz, velocidad y dirección del viento, pluviosidad, entre otros.
- **Sensores aéreos:** drones con cámaras térmicas, hiperspectrales y de espectro visible.

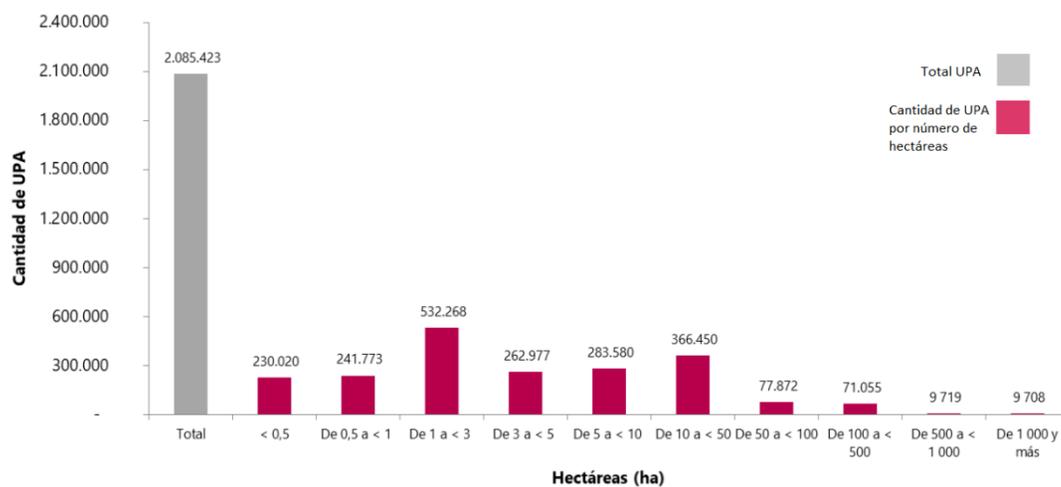
En la capa de enlace se generan los canales para comunicación de los nodos o el nodo coordinador y la puerta de enlace (*gateway*), con un determinado protocolo de enrutamiento. Los autores hacen uso del protocolo LoRaWAN para la transmisión de datos terrestres y Wifi (*Wireless fidelity*) para las imágenes aéreas. La capa de red permite la conexión de los nodos a internet y para ello se reconoce la importancia del direccionamiento IPV6 (*Internet Protocol version 6*) para aplicaciones de *IoT* (IPV6 sobre LoRaWAN e IPV6 sobre Wifi). La capa de *middleware* (o de transporte) es responsable de establecer y controlar la asociación entre los dispositivos de sensores de *IoT*, mientras que la capa de configuración se ocupa de los protocolos que se ejecutan en la parte superior de la plataforma de *IoT* y la obtención y organización de los datos durante la comunicación, para su posterior presentación y utilización en la capa de gestión, que es donde se pueden aplicar diversas técnicas de ciencia de datos y que permiten el posterior análisis de información geoespacial, así como el uso de técnicas de inteligencia artificial para la predicción de algunas variables que faciliten la toma de decisiones (*Apache Spark Framework* y *WEKA Framework, Waikato Environment*). Por último, se presenta en la arquitectura de referencia la capa de aplicación, donde los usuarios interactúan con el proceso de manera remota. Además, los autores también consideran componentes para el ahorro energético y la seguridad en todas las capas de la arquitectura.

Como referencia para la topología de la capa física, se utilizó el trabajo de Codeluppi et al., (2020), quienes implementan una arquitectura llamada LoRaFarM (*LoRaWAN-based Smart Farming Modular IoT Architecture*) en una granja de Italia donde se cultivan frutas, verduras, flores comestibles, hierbas y uvas para vino. La topología de su capa física en estrella se fundamenta en las tecnologías LoRa y LoRaWAN, por su amplio alcance y un bajo consumo energético. Es importante anotar que, en este trabajo, los autores consideraron una arquitectura de la plataforma más simple que la presentada en el trabajo de Triantafyllou et al. (2019). Así, en la primera capa o capa de percepción están los dispositivos que interactúan con el entorno y obtienen la información de este, la segunda capa de red permite el intercambio de información entre dispositivos y red, y la tercera capa o capa de aplicación es donde se pueden visualizar los datos obtenidos.

La mayoría de arquitecturas mencionadas anteriormente se han implementado en producciones agrícolas industrializadas, donde las condiciones de infraestructura y las posibilidades de inversión dan acceso libre al desarrollo de las tecnologías 4.0. Caso contrario se presenta en zonas rurales de países en desarrollo como Colombia, donde la infraestructura y las posibilidades de inversión son remotas y la agricultura tradicional parece ser la única opción viable. Aunque el cultivo tradicional les permita tener un sustento económico, también los vuelve vulnerables y

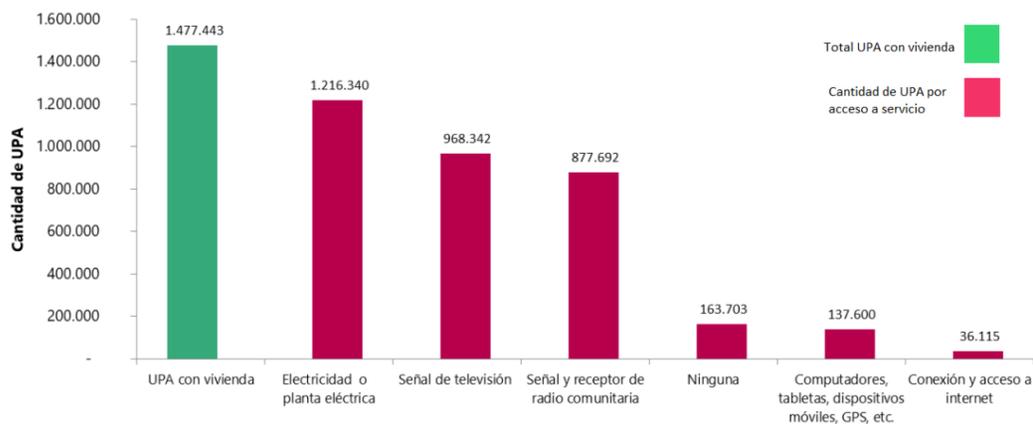
susceptibles a pérdidas, debido a su desconexión con el comportamiento del mercado y su baja competitividad.

Además de explorar las herramientas de *IoT*, este trabajo tiene como objetivo la inclusión digital de familias campesinas y pequeños agricultores, cuyos terrenos son considerados pequeñas unidades de producción agrícola (UPA), término que en Colombia se utiliza para clasificar las unidades agrícolas productivas por rangos de tamaño en diferentes regiones. Las pequeñas UPA (de máximo 10 hectáreas) representan alrededor del 70,8 % del total de la UPA, como puede observarse en la figura 1. La mayoría de estas unidades (casi un 98 %) no cuentan con conectividad a internet, lo que limita la oportunidad de acceder a las tecnologías de la industria 4.0 (Ahmed et al., 2018). La figura 2 muestra dicha problemática.



**Figura 1.** Cantidad de unidades de producción agropecuaria según tamaño de la UPA

Fuente: DANE, 2019



**Figura 2.** Cantidad de UPA con vivienda y tecnologías de información, comunicación y conectividad

Fuente: DANE, 2019

El proyecto piloto fue ubicado en el corregimiento de San Cristóbal del municipio de Medellín en Colombia, zona que se caracteriza por ser una de las principales productoras de hortalizas a pequeña escala de la región y en la cual, en los últimos años, la implementación de estos cultivos bajo invernaderos con el apoyo de la Alcaldía de Medellín ha venido en aumento. Una de las principales limitantes para la productividad de estos cultivos es la falta de asistencia técnica efectiva y oportuna, debido a la gran cantidad de productores que deben ser atendidos en tan poco tiempo, ya que estos cultivos son de ciclo corto y las entidades como la Alcaldía de Medellín no cuentan con el personal técnico necesario para atender todas sus necesidades (Milan-Valoyes, 2017).

El objetivo de este estudio es seleccionar herramientas y desarrollarlas, incluyendo el uso de conceptos de arquitecturas previamente diseñadas que permitan la captura, el almacenamiento y la visualización de datos, principalmente para la implementación de dos capas: (1) la capa física de la plataforma, que es el primer paso para tener un sistema de recolección de datos de forma remota, y (2) la capa de enlace, que utiliza la implementación de protocolos LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*) como LoRaWAN y finalmente la presentación de una plataforma web que permita visualizar la información en tiempo casi real, para aplicarla a una topología propia y al alcance de los pequeños agricultores.

Una contribución de este trabajo es la replicabilidad de este, así como las oportunidades de escalabilidad en cuanto a variables de monitoreo, diseño de herramientas propias en las otras capas de la arquitectura e inclusión de otras UPA. Además, con la información presentada es posible realizar análisis de costos y análisis de eficiencia en cada etapa con otros proyectos para trabajos futuros.

## **Materiales y métodos**

### **Elección del predio**

El lugar de estudio se llevó a cabo en el corregimiento San Cristóbal, de la ciudad de Medellín, considerado sitio de paso y de reposo entre Santa Fe de Antioquia, Medellín y Río Negro. El corregimiento se encuentra localizado en la vertiente norte de la cuenca de la Quebrada La Iguana, su principal cuenca hidrográfica, la cual tiene una extensión de 49,5 km<sup>2</sup> y sus terrenos son de alta pendiente, los cuales están divididos en 18 veredas. Además, cuenta con suelos fértiles y condiciones climáticas propicias para la actividad agrícola, la cual es la principal actividad económica del corregimiento y que cuenta con una alta producción en frutas y hortalizas, también destacándose notoriamente en la floricultura, con productos que, en parte, van destinados al comercio local y otra parte al comercio en la ciudad de Medellín. Por último, la actividad pecuaria y avícola que se desarrolla en el corregimiento es, en la mayoría de los casos, para el autoconsumo (Alcaldía de Medellín, 2015).

En el año 2019 se llevó a cabo un proyecto por parte de la Alcaldía de Medellín, en el marco del Plan Agropecuario Municipal (PAM), el cual asignó 40 invernaderos de 300 m<sup>2</sup> cada uno a pequeños productores pertenecientes al corregimiento de San Cristóbal (Rodríguez et al., 2016).

Con el proyecto “Plataforma *IoT* de bajo costo utilizando tecnologías 4.0 para agricultura inteligente”, se pretenden aprovechar las herramientas que se tienen a la mano para proporcionar a los productores y a los asistentes técnicos acceso a la información de manera remota y ágil. Así, se seleccionaron dos productores de la región para llevar a cabo el proyecto piloto.

Para seleccionar los predios se tuvieron en cuenta diversos factores y variables y, finalmente, se utilizaron los invernaderos proporcionados anteriormente por el proyecto que se realizó en el marco del Plan de Desarrollo Municipal. Uno de los primeros puntos evaluados para la selección del predio fue la disposición del agricultor a la innovación, ya que la implementación de nuevas tecnologías normalmente genera resistencia por parte de algunos productores (Andrade et al., 2017). Otro punto que se tuvo en cuenta fue su trayectoria como productores constantes y por el buen uso y mantenimiento que realizan a sus invernaderos; también se tuvo en cuenta la ubicación de la zona para una correcta proyección de la señal, es decir, que no existiera mucha interferencia (edificaciones, zonas densamente pobladas) (Ji et al., 2019) y que tuviera una vista directa hacia la puerta de enlace (*gateway*). Las figuras 3 muestran los invernaderos de las fincas seleccionadas.



**Figuras 3.** Predios seleccionados: 3a. Finca 1 invernadero de tomates y 3b. Finca 2 con invernadero de cebolla y cilantro

Fuente: Elaboración propia

Al momento de la instalación en los predios seleccionados, los nodos se ubicaron de manera estratégica en el centro del invernadero (figuras 4) a una altura por encima de las mangueras de riego por microaspersión, esto con el fin de evitar daños en los dispositivos instalados, al tener menor interacción directa con la humedad. Además, este punto estratégico en el centro del invernadero proporciona mayor fiabilidad sin que se vean afectados los instrumentos por factores externos como estructuras que proporcionan sombra a un costado del invernadero a cierta hora del día, lo cual modifica los valores en temperatura y en luminosidad, también a la lluvia o las corrientes de viento espontáneas que suelen bajar la temperatura en el perímetro del invernadero, por efecto de la termodinámica, entre otros factores. Finalmente, los nodos fueron instalados en dos invernaderos de 300 m<sup>2</sup>: el primero está ubicado aproximadamente a 2300 m s.n.m. y tiene una pendiente aproximada del 30 %, con cultivos de hortalizas de cebolla verde

(*Allium fistulosum* L.) y cilantro (*Coriandrum sativum*) y el segundo invernadero está ubicado a casi 2320 m s.n.m. y tiene una pendiente aproximada del 0 % con cultivo de tomates (*Solanum lycopersicum*).



**Figuras 4.** Ubicación de los nodos dentro del invernadero: 4a. Nodo dentro del invernadero de la finca 1 y 4b. Nodo dentro del invernadero de la finca 2

Fuente: Elaboración propia

Una vez ubicados los nodos y probada la transmisión correcta de los datos, se realizó un seguimiento continuo los días siguientes con ayuda de los agricultores para corroborar el éxito de la instalación. Para la implementación del *IoT*, primero se diseñó e implementó la capa de percepción o nodos, estos son la base de la primera fase del proyecto y son los dispositivos que componen la capa física para medir las variables de los cultivos. La elección de los elementos que conforman los nodos se hizo con referencia a la arquitectura de Codeluppi et al. (2020), puesto que utilizan dispositivos de bajo consumo energético, pero con gran robustez y bajo costo.

### Capa física o de percepción

Cada nodo se encuentra compuesto por un sistema de unidad de procesamiento, un sistema de alimentación, unos sensores y su caja de aislamiento o protección ambiental. Los elementos de cada nodo pueden verse en la tabla 2, en la sección de costos del proyecto.

**Unidad de procesamiento:** consta del microcontrolador, la tarjeta expansora y la antena para la comunicación inalámbrica. Se utiliza una placa de desarrollo LoPy4 que ofrece una conexión con LoRa, Sigfox, Wifi y *bluetooth*. La integración de estas cuatro opciones en una sola tarjeta representa una gran ventaja, debido a que no se requieren accesorios adicionales para la comunicación inalámbrica, como es el caso de las tarjetas Raspberry y Arduino. Otro criterio relevante al seleccionar la tarjeta LoPy4 es su ultra bajo consumo de energía (Menor de 400 mA) y, adicionalmente, cuenta con gran adaptabilidad a placas estándares expansoras. Además, se usa una tarjeta de expansión Pysense, que es indispensable para la configuración del dispositivo e

incorpora cinco sensores (de luz ambiental, presión barométrica, humedad, temperatura y giroscopio), esta solo se utilizó en una fase de pruebas debido a que no permite tener puertos disponibles suficientes para ubicar otros sensores.

También se utiliza la antena para LoRaWAN con conector IPEX a SMA de 915 MHz, según el estándar estadounidense, ya que con el uso de la tecnología inalámbrica LoRaWAN, su factor de expansión configurado en 7 (*spreading factor*,  $SF = 7$ ) permite alcanzar una distancia de hasta 5 kilómetros (la más baja) con el menor consumo energético y la mayor velocidad que permite el protocolo y como puerta de enlace multicanal se utiliza un Dragino DL08 compatible con el protocolo LoRaWAN. Este dispositivo conecta la red inalámbrica de LoRa a una red IP a través de Wifi, ethernet o celular, con el fin de recibir las tramas de datos desde una gran cantidad de nodos. De esta manera, se cuenta con la facilidad de integrar muchos más nodos al sistema de agricultura inteligente (Dragino, 2020a, 2020b).

**Sistema de alimentación:** consta de una batería tipo LiPo (litio-polímero) con un voltaje de salida 3,7 V a 780 mAh, un panel solar monocristalino de 2 W y un cargador solar Li-Po. Otra ventaja del microcontrolador elegido es que puede llevarse a un estado de “sueño profundo” o descanso mientras no se requiera envío de datos, lo que reduce significativamente el consumo energético. Así que para estimar el consumo total que requiere el sistema, basado en la ficha técnica del dispositivo, de los sensores y con un envío de datos cada 20 minutos (1200 segundos), de los cuales toma solo 10 segundos para el envío de datos, se estima un consumo inicial de 22,2 mAh, lo que supone una autonomía en la batería de 1,5 días aproximadamente; sin embargo, se debe contrastar este consumo con la medición real, que en muchos casos puede ser mucho menor dependiendo del factor de expansión configurado y la desactivación de otras funciones que no son requeridas por el microcontrolador para la aplicación.

**Sensores:** el sistema de sensores tiene como objetivo recopilar los parámetros del entorno, se tienen en cuenta las mediciones de humedad relativa (%), temperatura (°C), luz visible (lux), luz infrarroja (lux) y luz ultravioleta (índice UV). Además, como criterios de selección básicos se requieren sensores de bajo consumo energético de bajo costo y que puedan adaptarse al entorno, con base en esto se utiliza un sensor de humedad y temperatura industrial SHT10, ya que es resistente al entorno y tiene mediciones muy precisas, tanto en suelo como en aire, y se utiliza también un sensor de luz solar Si1145 para detectar los rayos UV, luz visible y luz infrarroja, el cual tiene un buen rendimiento bajo un amplio rango dinámico y soporta la luz solar directa, aunque requiere de protección ambiental externa.

**Protección ambiental:** para estos nodos se requiere de cajas de protección Ip65 y prensas estopa que aíslan la parte interior, para garantizar una resistencia contra el agua, el polvo y otros factores ambientales que puedan ocasionar un daño a los equipos.

## Capa de enlace

Como se mencionó anteriormente, para la capa de enlace contamos con el protocolo LoRaWAN para la transmisión de datos, ya que con la implementación del protocolo OTAA (*Over the Air Authentication*), la LoPy4 envía una solicitud para conectarse al *gateway*, el cual utiliza las claves provistas por la aplicación de TTN (*The things Network*) y una vez se recibe la confirmación de

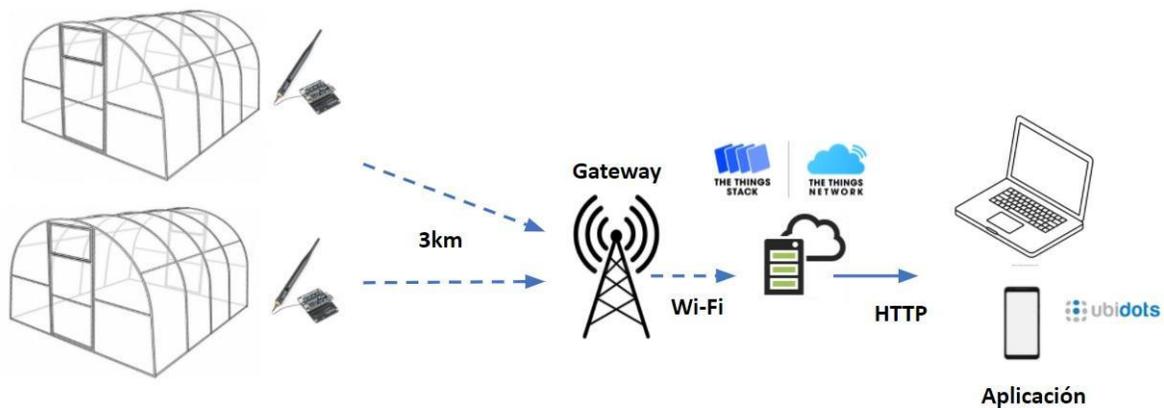
unión a la puerta de enlace se comienzan a enviar los datos de los sensores. La puerta de enlace se puede ubicar a una distancia de hasta 15 km en un campo abierto y puede soportar más de 100 nodos. La trama de 128 bites de datos que puede recibir el servidor es enviada con un ancho de banda de 125 kHz a 5,5 kbits/s. Esta trama cifrada de inicio a fin es enviada y puede ser decodificada en la plataforma web.

### Capa de aplicación

Una vez los datos llegan a la puerta de enlace, este usa una red Wifi para enviarlos a un servidor y a la plataforma, donde son decodificados con ayuda de código. La plataforma de acceso gratuito que se integra de forma transparente al proceso es TTN versión 3, cuya última versión de consola es *The Thing Stack* (TTS), este servidor de *IoT* es de código abierto y permite programar la puerta de enlace y las aplicaciones donde se pueden registrar diversos nodos. Básicamente, se conectan los datos derivados de estos a internet a través del servidor disponible para uso libre (*eu1.cloud.thethings.network*). El *gateway*, como dispositivo multicanal, permite la transmisión de datos desde diversos nodos de manera simultánea, sin embargo, la cuenta gratuita en esta plataforma proporciona la integración de un dispositivo como puerta de enlace, una aplicación y diez dispositivos como máximo. Cada nodo puede transmitir hasta 128 bits y la transmisión de los datos deben ser, como mínimo, cada tres minutos, además, se debe tener en cuenta que el tiempo de transmisión de datos debe ser optimizado con el fin de mantener un consumo bajo de energía.

TTN es una plataforma que no maneja almacenamiento de datos, sino que solo permite visualizarlos en tiempo real si el usuario hace un seguimiento del estado de los dispositivos. Se ofrece la opción de establecer integraciones con otras aplicaciones y bases de datos a través de protocolos como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), con el fin de mantener un registro permanente de los datos recolectados y poder aplicar herramientas de ciencias de datos e inteligencia artificial para el tratamiento de estos en otra capa de la arquitectura. El aplicativo que se utiliza en este proyecto es Ubidots, este se integra con TTN a través del protocolo HTTP, lo cual permite conectar los aplicativos de *IoT*, almacenar la información de todas las variables de forma automática en la nube, visualizar el último registro de forma más amigable para el usuario final y enviar alertas si hay algún comportamiento inusual. Ubidots también cuenta con su versión de instalación para Android, lo cual permite acceder a los datos desde cualquier lugar. Esta plataforma se utiliza de forma temporal, debido a que su versión gratuita tiene una limitación por un año en el almacenamiento de datos y limitaciones de visualización. El objetivo es desarrollar una plataforma propia que sea lo más amigable posible para agricultores y asesores técnicos.

Para finalizar, se presenta la topología de arquitectura establecida (figura 5), la cual consiste en la conexión de las dos fincas seleccionadas con sus respectivos nodos, a 3 km de la puerta de enlace. El *gateway* se conecta a través del protocolo Wifi a la red de internet, con lo que los paquetes pueden llegar a la plataforma TTN y a través del protocolo HTTP a Ubidots, donde se almacena la información y se visualiza en panel de control o *dashboard*.

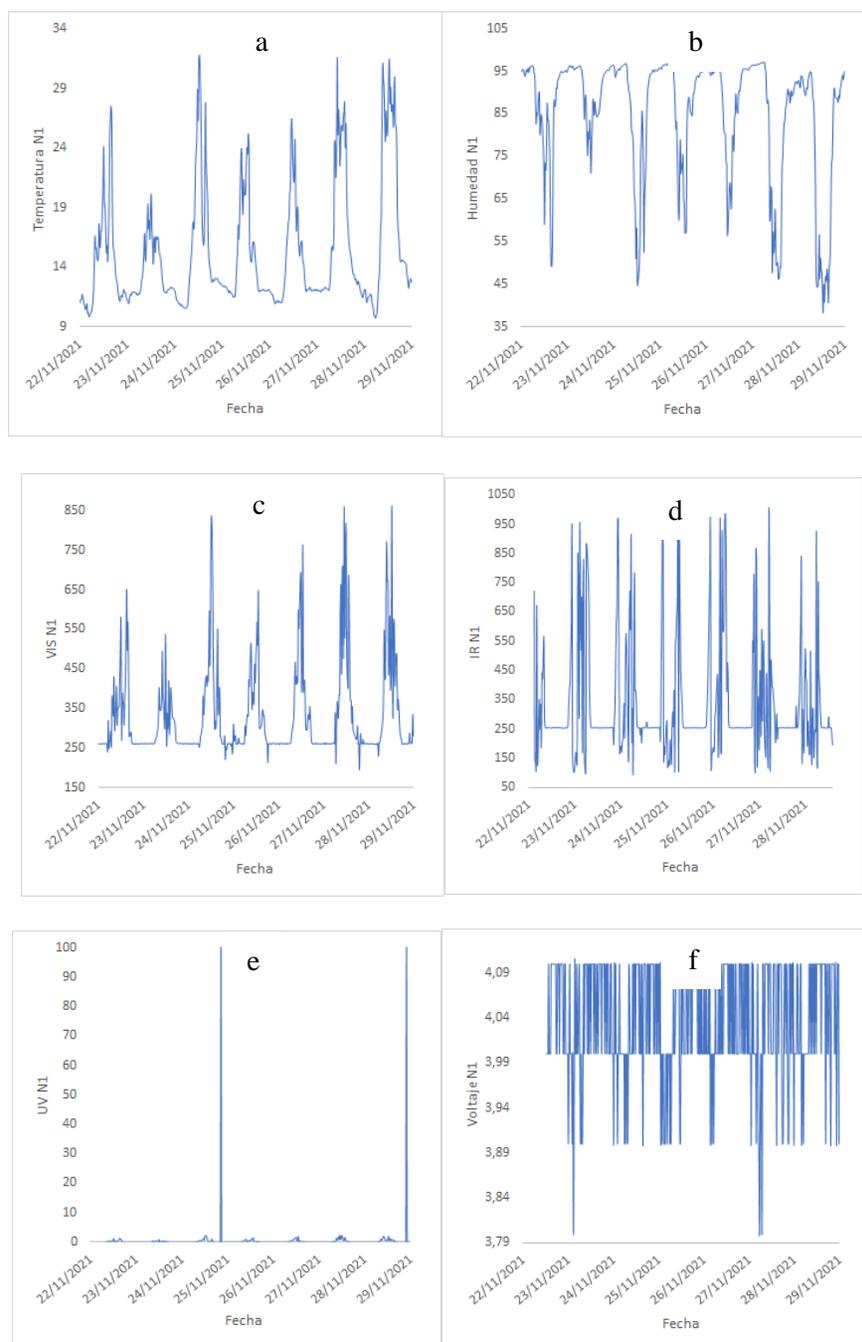


**Figura 5.** Topología de red con protocolo LoRaWAN  
Fuente: Elaboración propia

## Resultados y discusión

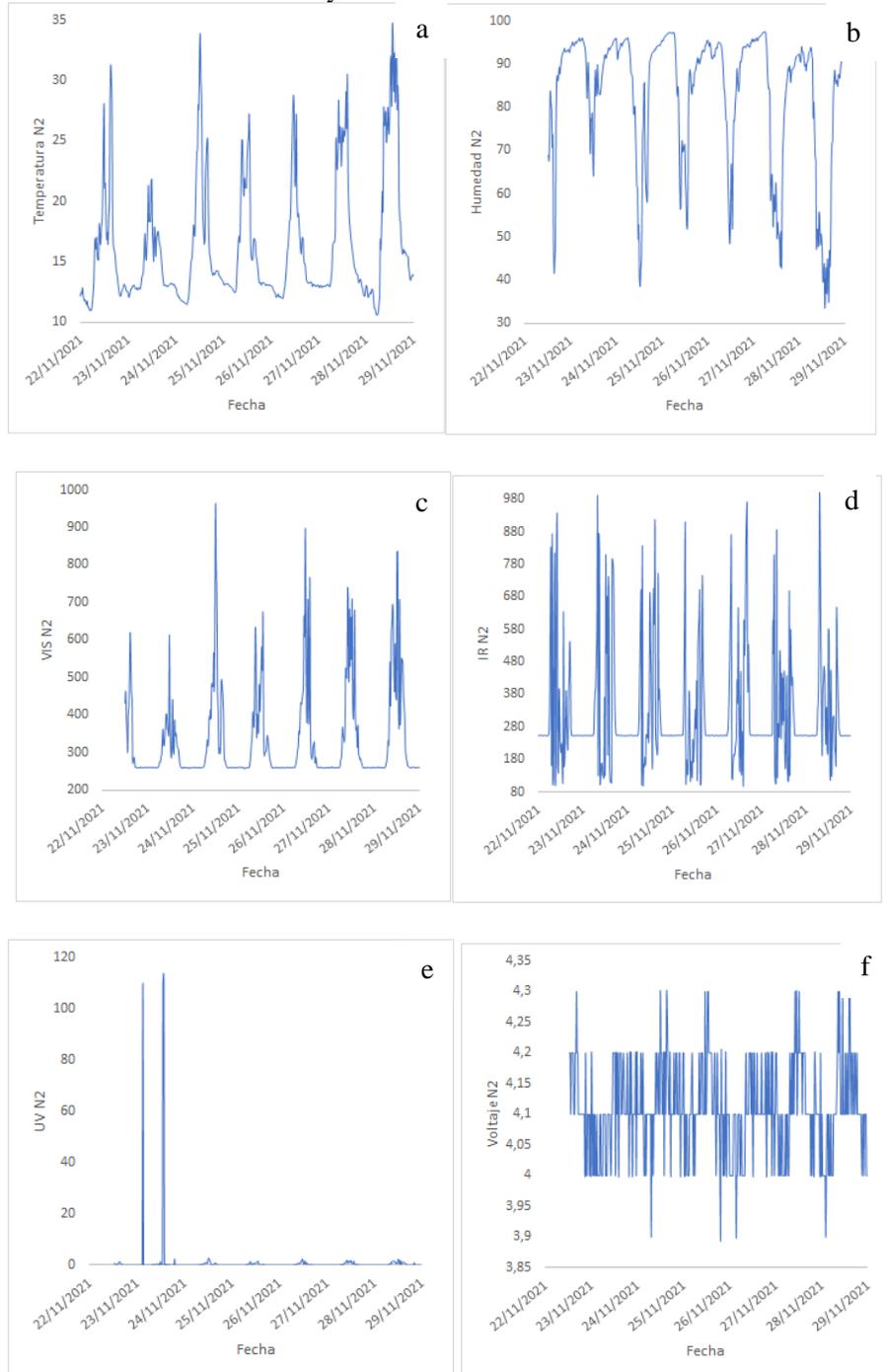
Con la topología de arquitectura establecida (figura 5), se comenzaron a recibir los primeros datos de los invernaderos de manera continua desde el 15 de octubre del 2021, con una captura de 72 datos al día por sensor (cada 20 minutos), con lo cual se recopilan alrededor de 30.000 datos al mes. La cantidad de datos tomados al día se estableció en consideración con el consumo energético y el comportamiento de la variable. La plataforma de Ubidots permite generar gráficos de series de tiempo con una cantidad limitada de datos que se muestrean a 2000 puntos cuando se toman largos periodos de tiempo. En las figuras 6 se puede observar la variación de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad relativa (%), los espectros de luz y la variación del voltaje del nodo, muestreados desde la primera toma de datos del invernadero 1 (cultivo de tomates); asimismo, en las figuras 7 se observan las mismas variaciones para el invernadero 2 (cultivo de cebolla y cilantro).

## Invernadero de tomates



**Figuras 6.** Variables adquiridas en el nodo 1 en la finca 1: 6a. Temperatura dentro del invernadero 1 (°C); 6b. Humedad relativa dentro del invernadero 1 (%); 6c. Espectro visible dentro del invernadero 1 (lux); 6d. Espectro infrarrojo dentro del invernadero 1 (lux); 6e. Índice de radiación UV dentro del invernadero 1 (índice UV) y 6f. Variación del voltaje del nodo 1 (V)  
Fuente: Elaboración propia

## Invernadero de cilantro y cebolla verde



**Figuras 7.** Variables adquiridas en el nodo 2, finca 2. 7a. Temperatura dentro del invernadero 2 (°C); 7b. Humedad relativa dentro del invernadero 2 (%); 7c. Espectro visible dentro del invernadero 2 (lux); 7d. Espectro infrarrojo dentro del invernadero 2 (lux); 7e. Índice de radiación UV dentro del invernadero 2 (índice UV) y 7f. Variación del voltaje del nodo 2 (V)

Fuente: Elaboración propia

## Análisis de resultados

Según las gráficas de temperatura, tanto en el invernadero 1 como en el invernadero 2, se observa un rango de variación entre 10 °C y 35 °C (máximo nocturno y diurno). Se puede observar también que en el invernadero 2 se registran valores más bajos (cerca de 3 °C menos de temperatura) mientras que en el invernadero 1 (de tomates), se registraron temperaturas un poco más altas. Estos resultados deben ser contrastados con los rangos de temperatura óptimos para el cultivo de tomate, específicamente para la variedad cultivada en cada caso, pues esta puede diferir y con base en esto realizar las recomendaciones necesarias para operar los mecanismos de ventilación del invernadero.

Igualmente, para los cultivos de cebolla y cilantro en el invernadero 2, deben contrastarse los valores con los rangos recomendados según la variedad. En este trabajo no se realizan análisis de la conveniencia o no de los rangos de temperatura registrados y se deja como un trabajo posterior. Los valores extremos de temperatura que estén por fuera de los rangos recomendados para cada cultivo pueden afectar de manera importante la productividad, debido a la muerte de tejidos o afectaciones en proceso fotosintético (Allende et al., 2017).

Para la humedad relativa, inversamente proporcional a la temperatura, los rangos registrados están en promedio entre 30 % y 97 % en el transcurso de 24 horas y alcanzan sus puntos más altos durante la noche, cerca de la madrugada, en ambos invernaderos. Las humedades relativas demasiado bajas, acompañadas de altas temperaturas, también pueden afectar la polinización del tomate. Así, el efecto de los elevados valores de humedad relativa puede afectar el desarrollo de enfermedades al cilantro y la cebolla, por lo que, en este caso, también es importante contrastar los valores registrados con los recomendados, según la variedad de cada cultivo (Allende et al., 2017; Tumbani, 2018).

El fotoperiodo en el que las plantas pueden recibir la mayor cantidad de luz directa posible es un factor importante para la floración de las hortalizas, por lo que el invernadero debe tener la capacidad de dejar pasar la mayor cantidad de ondas de luz benéficas para la planta al tiempo que rechaza las dañinas, como los rayos UV que provocan daños en el ADN, la fotosíntesis, el afloramiento, la polinización y el desarrollo de las semillas (Allende et al., 2017), es por ello que la cubierta del invernadero debe ser adecuada para la entrada de luz que requiera la planta, lo cual se garantiza con una adecuada limpieza periódica para retirar el polvo y otros obstáculos que impidan el paso de esta (Seemuang, 2017). La medición de intensidad de luz en sus diferentes espectros permite observar si la planta cumple con los requerimientos óptimos para realizar fotosíntesis y otros procesos (Fuentes, 2019).

Para ambos invernaderos, los valores de espectro visible e infrarrojo alcanzan niveles altos en los días más soleados (superior a 800 lux) y los valores mínimos durante las noches (inferior a 200 lux). Con los datos registrados, se observa un índice de rayos UV que se encuentra en un rango entre 0 y 2, dichos valores, según la tabla del índice de UV (Silicon Labs, 2008), se encuentran en un nivel bajo, sin embargo, también se pueden apreciar, de manera muy notoria, valores atípicos que sobrepasan el nivel más alto de la tabla que es de un índice UV de 11, puesto que se alcanzan valores superiores a un índice UV de 100, se debe analizar si estos valores corresponden a un problema físico del sensor o de transferencia de datos.

Finalmente, los valores de voltaje son realmente estables para el invernadero 1, con valores de entre 3,9 V y 4,3 V y para el invernadero 2 se observó una ligera caída de voltaje en los primeros días, debido a una inadecuada configuración del dispositivo, de la corrección en adelante la variación de voltaje ha sido estable, de entre 3,8 V y 4,2 V. En ambos casos, el consumo energético en términos de voltaje tiene un comportamiento ideal, desde que no baje del valor óptimo de operación de 3,7 V. Para una visualización rápida y amigable de los datos en tiempo real, Ubidots ofrece un panel de control que le permite a los usuarios hacer una consulta del estado de sus cultivos, como se ve en la figura 8.



**Figura 8.** Panel de control del estado de los cultivos con la plataforma Ubidots

Fuente: Ubidots, s. f.

## Discusión

### Relevancia del estudio

La visualización de un panel de control de variables de cultivo, como tal no es una ayuda significativa para un pequeño agricultor, por lo que esta debe estar acompañada de un asesoramiento técnico de calidad para comprender los datos y tomar decisiones efectivas en pro de la mejora del rendimiento de las cosechas; sin embargo, tener a disposición la información para planear estrategias es una de las tareas más complejas y que consume mayor tiempo y esfuerzo, por lo que una vez implementadas las primeras etapas de recolección y almacenamiento de datos, las posibilidades de allí en adelante son inmensas, por lo que se presentan a continuación cómo las variables medidas pueden convertirse en una gran oportunidad de gestión para un pequeño agricultor (Sinha & Dhanalakshmi, 2022).

**Sensor de temperatura:** como se observó en la sección de análisis de resultados, la temperatura durante el día y la noche se mueve en determinados rangos al interior del invernadero, por lo que la medición debe ser corroborada con los rangos adecuados para la producción de las diferentes especies de hortalizas. Con esta información y con el conocimiento de los rangos al interior del invernadero, es posible emplear una estrategia de ventilación, para garantizar los rangos óptimos de temperatura que requiere la producción. Al tener esta información disponible

en tiempo real, se pueden integrar actuadores que permitan gestionar la ventilación de forma automática o de forma manual por medio de un aplicativo desde cualquier parte del mundo.

**Sensor de humedad:** la humedad relativa del aire tiene un gran impacto en el crecimiento de la planta y la aparición de enfermedades. La humedad, al igual que la temperatura, debe permanecer en un rango adecuado durante el día y la noche. Al ser una variable indirectamente proporcional a la temperatura, al poder modificar la temperatura, también se logra el control de la variable de la humedad. Al corroborarse los rangos de humedad adecuados, con la gestión de la ventilación al interior del invernadero, se pueden garantizar los niveles de humedad sin dejar de lado la variable de la temperatura.

**Sensor de luz:** la cantidad de luz puede influir en el proceso de fotosíntesis de la planta, al observar una cosecha con una cámara infrarroja y analizar su concentración de rojo, se da un indicativo de la calidad del crecimiento del cultivo, esta cantidad debe corroborarse dependiendo de la especie en cuestión, así que medir el espectro infrarrojo de forma directa puede dar información de la adecuada nutrición de la palta. Por otro lado, el índice UV cumple un papel crucial, ya que según Sinha y Dhanalakshmi (2022): “la radiación UV afecta al sabor, la fragancia y el aspecto de los cultivos alimentarios”, de allí la importancia del cultivo bajo invernadero que recibe menores cantidades de radiación UV que los cultivos exteriores.

### Comparación de resultados encontrados en la literatura

En Codeluppi et al. (2020) se exponen los resultados obtenidos en la instalación de dos nodos internos ubicados dentro de un invernadero, con el fin de obtener la humedad relativa y la temperatura y dos nodos externos ubicados en el viñedo para monitorear la temperatura y la humedad del suelo, donde la recolección y el envío de los datos del nodo SN-V2 se efectúa en un intervalo de 10 minutos, mientras que el nodo SN-V1 transmite cada 30 minutos, esto con el objetivo de analizar el desempeño al muestrear los datos en un lapso grande y evitar saturar la red, ya que depende de la cantidad de mensajes enviados por hora; posteriormente, se almacenan los datos en una base de datos MySQL. Los datos de prueba para la temperatura fueron recolectados aproximadamente durante tres meses con dos sensores diferentes y se obtuvieron datos similares, con mayores valores por el día y menores por la noche. Se observó que la disposición del sensor en forma vertical u horizontal hace diferir las medidas hasta en 1 °C.

Los resultados en el análisis de los datos como máximos, mínimos y promedios muestran un mejor comportamiento para el sensor que tomó datos cada 10 minutos, puesto que se tiene más información. La vida útil varía significativamente entre los nodos internos y externos, debido a que se utilizaron diferentes microcontroladores en los nodos, para los internos se usó la LoPy4 y para los externos el CC, esta diferencia se debe al consumo de corriente en un estado de inactividad, ya que LoPy4 consume 0,05 mA y CC consume 9 mA.

En comparación con la implementación del proyecto, es necesario implementar un nodo externo para hacer un adecuado análisis de resultados con respecto al estado de las variables dentro y fuera del invernadero. Además, se considera probar tecnologías como la Raspberry pi 4 para conectar el sensor del flujo y una cámara para capturar imágenes dentro del invernadero, lo que conlleva a un desarrollo posterior para enviar todos estos datos por el protocolo de LoRaWAN,

donde se ve un reto a la hora de enviar imágenes por las frecuencias que se utilizan para este tipo de aplicaciones (Triantafyllou et al., 2019). Con una transmisión de cada 20 minutos de los datos, como intervalo intermedio para reducir el consumo de energía en los nodos, se tiene como objetivo hacer un análisis a partir de los tres meses de la toma de datos para hacer una adecuada comparación de estos resultados.

### Costos del proyecto

Los elementos del nodo ya descritos y su costo se presentan en la tabla 2, la cual muestra el valor de la inversión inicial para instalar a un nodo, dicho valor es una base para posteriores comparaciones con respecto a las inversiones en asistencia técnica. Los valores que se muestran en la tabla 2 han sido convertidos a dólares, sin embargo, su adquisición inicial ha sido en pesos colombianos.

**Tabla 2.** Elementos de un nodo e inversión inicial

Unidad de procesamiento	Cantidad de nodos	Precio unitario
Antena de 900 MHz	1	USD 129,58
Cable interfaz	1	
LoPy4	1	
Shield Expansion PYSENSE	1	
<b>Alimentación</b>		
Batería LiPo de 3,7 V	1	USD 57,44
Panel solar de 2 W	1	
Cargador solar Li-Po	1	
<b>Sensores</b>		
Sensor de humedad y temperatura	1	USD 395,18
Sensor análogo de CO <sup>2</sup> *	1	
Sensor de luz solar	1	
Sensor de EC y salinidad*	1	
Sensor de flujo de agua*	2	
<b>Accesorios de protección</b>		
Caja plástica Rocker	1	USD 13,41
Prensas estopa	5	
<b>Otros</b>		USD 30,66
<b>Total</b>		USD 626,27

Nota aclaratoria: \*sensores que se encuentran en etapa de pruebas.

Fuente: Elaboración propia

## Recomendaciones y perspectivas

Como perspectiva, se planea la incorporación de otros dos nodos internos que utilizan una tarjeta Raspberry Pi 4B de 4 GB. Este modelo presenta mejoras en la velocidad de procesamiento, desempeño multimedia, memoria y conectividad, para lo cual se requiere de un módulo de expansión Lora/GPS HAT con una banda de frecuencia de 915 MHz que permite incorporar funciones de LoRa y ampliar su rango de comunicaciones con un consumo de corriente mínimo, además, el nodo cuenta con un sensor de temperatura y un indicador de batería baja. La alimentación consta de una batería sellada de 12 V, un panel solar policristalino de 18 W y un controlador solar con una capacidad de 10 A. Adicionalmente, se hará uso de una estación meteorológica externa que cuenta con anemómetro, veleta y cubo de lluvia, que incluye sensores de humedad y temperatura DH11. Para la estación se utilizará un microcontrolador compatible y una tarjeta de Arduino UNO, la cual tiene un bajo costo en el mercado y cuenta con gran flexibilidad y documentación. Este nodo se conectará de una fuente eléctrica ubicada en la casa del agricultor.

Para la plataforma, se espera realizar la integración de una base de datos relacional que permita migrar a bases de datos no relacionales, que posibilitan el análisis de grandes volúmenes de datos, la implementación de técnicas de inteligencia artificial para proyecciones y pronósticos y un desarrollo de servicio web y móvil que garantice una buena interacción y experiencia de los agricultores y asesores técnicos.

Se recomienda realizar un adecuado análisis del consumo energético, que incluya los elementos de control, transmisión y sensores que puedan ser implementados. Las pruebas realizadas dan muestra de la importancia de tener un sistema de alimentación en óptimas condiciones, en particular la elección correcta del controlador solar y del monitoreo del consumo de baterías. Por otro lado, es necesario tener un espacio adecuado para realizar pruebas de marcha del nodo antes del montaje en campo, en el cual se evalúe por varios días el correcto funcionamiento de todos sus componentes. Por último, se sugiere mantener comunicación continua con los productores, para asegurar el acceso a los cultivos durante la instalación. La comunicación también fomenta la participación de los agricultores para garantizar la actividad del nodo de manera continua, puesto que pueden presentarse incidentes que deben solucionarse en campo. Esto último genera una vinculación activa del agricultor con la técnica y esto lo hace estar más abierto a la innovación.

## Conclusiones

Una de las impresiones alrededor de las tecnologías 4.0 es que su implementación solo es posible con alta capacidad de inversión por parte empresas de producción agrícola, como es la costumbre. Con este trabajo y las oportunidades de servicios de acceso libre, como las plataformas de *IoT* con disponibilidad de servidores y de integraciones de *software* gratuito, se puede afirmar que es posible integrar a pequeños agricultores con limitaciones de conectividad que deseen ser parte de la transformación digital por la que atraviesa la actividad agropecuaria en todo el mundo. Las oportunidades de gestión que se encuentran al ser parte de esta

transformación son muy diversas e impulsan a los agricultores tradicionales a cambiar sus métodos para ser más eficientes y competitivos.

La propuesta planteada en este trabajo constituye un primer paso en la implementación de una plataforma de agricultura inteligente para pequeños productores. Los resultados obtenidos muestran el éxito de la implementación, sin embargo, hay tareas que se pueden desarrollar para trabajos futuros:

1. Análisis de eficiencia de la vida útil de las baterías, dado que son baterías de litio y pueden tener unos ciclos de vida reducidos, por lo que se propone plantear protocolos de ahorro de energía.
2. Análisis de compatibilidad y facilidad de conectividad, puesto que se trabaja con dispositivos de distintas marcas y manufacturas, por lo que se puede ver bastante afectada la conectividad entre ellos.
3. Análisis de aspectos socioculturales y del entorno, como pueden ser barreras geográficas, culturales y socioeconómicas, las cuales pueden ser abordadas desde distintos contextos, en estudios posteriores.
4. Indicadores de beneficios para el agricultor. En estudios posteriores se debe medir el impacto del uso de estas tecnologías en la productividad de los cultivos y en la mejora de la calidad de vida de los campesinos.

La mayor parte de la literatura revisada reporta instalaciones de plataformas en contextos de países desarrollados, por lo que esta implementación puede constituir un aporte en el desarrollo de futuras plataformas dentro del contexto latinoamericano. Para un próximo trabajo, se considera el aplicar técnicas de inteligencia artificial con el fin de hacer análisis predictivos, además de mejorar el trabajo en la capa de aplicación para la interacción de los agricultores con la plataforma y así poder aportar en la gestión de los recursos y mejorar las técnicas de cultivo.

## Descargos de responsabilidad

Los autores manifiestan que no se presenta ningún conflicto de intereses dentro de la presentación de este trabajo de investigación.

## Contribución de los autores

Paulina Arregoces-Guerra: diseño y desarrollo de componentes físicos para sistema de adquisición de datos y otros dispositivos electrónicos, ensamblaje de componentes electrónicos, pruebas de rendimiento y funcionamiento de *hardware* y elaboración y revisión del manuscrito; Juan Felipe Restrepo-Arias: formulación del proyecto para acceso a recursos económicos, planificación, coordinación y supervisión de la actividad investigativa y de campo, participación en la búsqueda del arte, contacto con agricultores y proveedores y elaboración y revisión del manuscrito; Manuela Usme Martínez: diseño y desarrollo de componentes físicos para sistema de adquisición de datos y otros dispositivos electrónicos, ensamblaje de componentes

electrónicos, pruebas de rendimiento y funcionamiento de *hardware* y elaboración y revisión del manuscrito; Juan Pablo Montoya-Yepes: diseño y desarrollo de componentes físicos para sistema de adquisición de datos y otros dispositivos electrónicos, ensamblaje de componentes electrónicos, pruebas de rendimiento y funcionamiento de *hardware* y elaboración y revisión del manuscrito; John Willian Branch-Bedoya: adquisición del apoyo financiero para el proyecto que conduce a esta publicación, administración del proyecto y revisión del manuscrito.

## Implicaciones éticas

El presente artículo no requirió el aval de parte del Comité de Ética de la Universidad Nacional de Colombia.

## Conflicto de interés

Los autores manifiestan que no se presenta ningún conflicto de intereses dentro de la presentación de este trabajo de investigación.

## Financiación

La Universidad Nacional de Colombia, desde el Grupo de Investigación en Inteligencia Artificial (GIDIA), se encargó de la financiación de este trabajo de investigación a partir del proyecto HERMES 50224.

## Referencias

- Ahmed, N., De, D., & Hussain, I. (2018). Internet of Things (IoT) for Smart Precision Agriculture and Farming in Rural Areas. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4890-4899. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2879579>
- Alcaldía de Medellín. (2015). Formulación del Plan de Desarrollo Corregimental de San Cristóbal 2006 - 2016. <https://rbmam.janium.net/janium/Portadas/510045SG.pdf>
- Allende, M., Salinas, L., Rodríguez, F., Olivares, N., Riquelme, J., Antúñez, A., Martínez, J., Corradini, F., Sepúlveda, P., Abarca, P., Guzmán, A., & Felmer, S. (2017). *Manual de Cultivo del tomate bajo invernadero*. Ministerio de Agricultura. <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/12 Manual de Tomate Invernadero.pdf>
- Andrade, F., Taboada, M., Lema, D., Maceira, N., Echeverría, H., Posse, G., Prieto Garra, D., Sanchez, E., Ducasse, D., Bogliani, M., Gamundi, J. C., Frana, J., Trumper, E., Fava, F., Perotti, E., & Mastrángelo, M. (2017). *Los desafíos de la agricultura argentina. Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Ministerio de Agroindustria. <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-de-la-marina-mercante/geografia-mundial/los-desafios-de-la-agricultura-argentina/9239020>

- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E. H. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7, 129551-129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoraFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors* (Suiza), 20(7). <https://doi.org/10.3390/s20072028>
- DANE. (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena#:~:text=La%20Encuesta%20Nacional%20Agropecuaria%20%E2%80%93%20ENA,%25%2C%204.423.183%20toneladas%20a>
- Dragino. (2020a). *DLOS8 Outdoor LoRaWAN Gateway User Manual*. Dragino. [https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa\\_Gateway/DLOS8/DLOS8\\_LoRaWAN\\_Gateway\\_User\\_Manual\\_v1.3.pdf](https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa_Gateway/DLOS8/DLOS8_LoRaWAN_Gateway_User_Manual_v1.3.pdf)
- Dragino. (2020b). *Outdoor LoRaWAN Gateway OVERVIEW*. Dragino. [https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa\\_Gateway/DLOS8/Datasheet\\_DLOS8\\_LoRaWAN\\_Gateway.pdf](https://www.dragino.com/downloads/downloads/LoRa_Gateway/DLOS8/Datasheet_DLOS8_LoRaWAN_Gateway.pdf)
- Ferrández-Pastor, F. J., García-Chamizo, J. M., Nieto-Hidalgo, M., & Mora-Martínez, J. (2018). Precision agriculture design method using a distributed computing architecture on internet of things context. *Sensors* (Suiza), 18(6). <https://doi.org/10.3390/s18061731>
- Fuentes, J. C. (2019). *Efectos del uso de radiación de distintas longitudes de onda en el cultivo in vitro de Maqui, Aristotelia chilensis (Mol.) STUNTZ*. Universidad de Talca, Chile. [http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/12045/2/fuentes\\_fuentes.pdf](http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/12045/2/fuentes_fuentes.pdf)
- Guillermo, J. C., García-Cedeño, A., Rivas-Lalaleo, D., Huerta, M., & Clotet, R. (2019). IoT Architecture Based on Wireless Sensor Network Applied to Agricultural Monitoring: A Case of Study of Cacao Crops in Ecuador. En Corrales, J., Angelov, P., Iglesias, J. (editores), *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II. AACC 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 893. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3_3)
- Guo, Y., Zhao, H., Zhang, S., Wang, Y., & Chow, D. (2020). Modeling and optimization of environment in agricultural greenhouses for improving cleaner and sustainable crop production. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124843>
- Ji, M., Yoon, J., Choo, J., Jang, M., & Smith, A. (2019). LoRa-based Visual Monitoring Scheme for Agriculture IoT. *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706100>
- Köksal, Ö., & Tekinerdogan, B. (2019). Architecture design approach for IoT-based farm management information systems. *Precision Agriculture*, 20(5), 926-958. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-09624-8>
- Milan-Valoyes, A. Y. (2017). Caracterización del servicio de asistencia técnica agropecuaria desde la ley 607 del 2000, estudio de caso en el corregimiento de San Cristóbal en Medellín [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana] Repositorio Institucional Javeriano. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/34388>
- Mohamad Noor, M. B., & Hassan, W. H. (2019). Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey. *Computer Networks*, 148, 283-294. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.025>

- Mohammad El-Basioni, B. M., & Abd El-Kader, S. M. (2020). Laying the foundations for an IoT reference architecture for agricultural application domain. *IEEE Access*, 8, 190194-190230. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031634>
- Rodríguez, H., Úsuga, A. V., Toro, I. C., & Gutiérrez, S. (2016). *Guía para la formulación del programa agropecuario municipal (PAM)*. Fondo Editorial Biogénesis. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/biogenesis/article/view/325448>
- Seemuang, N. (2017). *A cleaning robot for greenhouse roofs*. 2017 2nd International Conference on Control and Robotics Engineering, Bangkok, Tailandia. <https://doi.org/10.1109/ICCRE.2017.7935040>
- Silicon Labs. (2008). *Si1145/46/47. Communication*. Silicon Labs. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Si1145-46-47.pdf>
- Sinha, B. B., & Dhanalakshmi, R. (2022). Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 126, 169-184. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.08.006>
- Triantafyllou, A., Sarigiannidis, P., & Bibi, S. (2019). Precision agriculture: A remote sensing monitoring system architecture. *Information* (Suiza), 10(11). <https://doi.org/10.3390/info10110348>
- Tumbani, Z. J. (2018). Evaluación de la asociación con dos especies fabáceas (*Crotalaria Júncea* y *Lupinus mutabilis*) con el cultivo de cilantro (*Coriandrum Sativum* L.) en invernadero de la comunidad Sullkataca baja del municipio de Laja [Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio UMSA. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/bitstream/handle/123456789/18351/T-2538.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ubidots. (s. f.). *Potente pero sencillo IoT industrial*. Ubidots. <https://ubidots.com/>