

**Implementación de un Sistema de Monitoreo de Variables para Invernaderos de Cultivo
de Tomates Basado en IoT**

**Andrés Felipe Villamizar Peña
Deyvid Fabián Suárez Cortés**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Mecatrónica
Tunja
2023**

**Implementación de un Sistema de Monitoreo de Variables para Invernaderos de Cultivo
de Tomates Basado en IoT**

**Andrés Felipe Villamizar Peña
Deyvid Fabián Suárez Cortés**

**Trabajo de Grado Para Optar al Título de:
Ingeniero Mecatrónico**

**Director:
Edwin Leonel Álvarez Gutiérrez
Ingeniero Mecatrónico**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Mecatrónica
Tunja
2023**

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 5 de junio de 2023

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
Diseño de la arquitectura de red	14
Criterios de selección.....	14
Materiales y métodos	14
Sensores de temperatura y humedad DHT22.....	15
Sensor de humedad del suelo resistente a corrosión	15
Módulo Wifi Wemos ESP8266.....	16
Módulo de comunicación inalámbrica NRF24LO1+LAN+PA	17
Funcionamiento.....	18
Diseño de la arquitectura de red.....	19
Nodo sensor.....	19
Nodo receptor.....	19
Base de datos en tiempo real de firebase.....	20
Arquitectura de red.....	20
Desarrollo del algoritmo de programación para el control de los sensores.....	22
Equipo 1	24
Equipo 2.....	26
Equipo 3.....	27
Equipo 4.....	28
Equipo 5.....	29
Desarrollo de la interfaz gráfica	35
Main activity.....	36
Temperature activity.....	37
Humidity activity	40
Pruebas y puesta en marcha del proyecto	42
Conclusiones.....	48
Referencias	49
Anexos.....	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Criterios de selección de materiales	14

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sensor DHT22.....	15
Figura 2. Sensor de humedad del suelo	16
Figura 3. Módulo Wifi wemos ESP8266.....	17
Figura 4. Módulo NRF24LO1+LAN+PA	18
Figura 5. Arquitectura de red.....	21
Figura 6. Dimensiones del invernadero y posicionamiento de los equipos.....	22
Figura 7. Interior del equipo de monitoreo.....	23
Figura 8. Exterior del equipo de monitoreo.....	24
Figura 9. Diagrama para el equipo 1	26
Figura 10. Diagrama para el equipo 2	27
Figura 11. Diagrama para el equipo 3	28
Figura 12. Diagrama para el equipo 4	29
Figura 13. Diagrama para el equipo 5	31
Figura 14. Base de datos en Firebase	32
Figura 15. Conexión ESP8266 con MySQL	33
Figura 16. Base de datos en MySQL.....	34
Figura 17. Conexión a Firebase.....	35
Figura 18. Interfaz principal	36
Figura 19. Diagrama de programación de botones.....	37
Figura 20. Interfaz de temperatura	38
Figura 21. Diagrama de programación de temperatura	39
Figura 22. Interfaz de humedades.....	40
Figura 23. Diagrama de programación de humedad.....	41
Figura 24. Ubicación de dispositivos	42
Figura 25. Baterías.....	43
Figura 26. Funcionamiento de la pantalla de temperatura.....	43
Figura 27. Funcionamiento de la pantalla de humedad	44

Figura 28. Notificaciones de temperatura.....	44
Figura 29. Notificaciones de humedad.....	45
Figura 30. Tabla de datos generada en MySQL.....	46
Figura 31. Gráfico de temperatura respecto al tiempo	47
Figura 32. Gráfico de humedad del ambiente y humedad del suelo respecto al tiempo	47

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto	51
Anexo B. Datos medidos	83

Resumen

Implementación de un Sistema de Monitoreo de Variables para Invernaderos de Cultivo de Tomates Basado en IoT

El presente trabajo de grado contiene el desarrollo de un sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos de tomate bajo invernadero en el municipio de Garagoa-Boyacá. El progreso del proyecto requirió del cumplimiento de los siguientes objetivos: selección de dispositivos de monitoreo necesarios, desarrollo de un sistema de supervisión y adquisición de datos, y diseño de una interfaz de usuario. Estos objetivos fueron clave para el correcto desarrollo y funcionamiento del sistema de monitoreo.

El objetivo general del proyecto fue implementar un sistema basado en IoT para el monitoreo de variables físicas en cultivos de tomate bajo invernadero. Este sistema posibilita garantizar las condiciones óptimas de crecimiento y producción de los tomates, contribuyendo así al desarrollo sostenible del sector agrícola.

Para lograr los objetivos planteados, se utilizó la metodología de investigación aplicada, dividida en tres fases: diseño de la arquitectura de red, desarrollo del algoritmo de programación para el control de los sensores y creación de la interfaz gráfica. Esta metodología permitió un progreso estructurado y ordenado del sistema de monitoreo.

En conclusión, la implementación del sistema de monitoreo basado en IoT para cultivos de tomate bajo invernadero, posibilita el seguimiento de variables ambientales relevantes en el proceso de cultivo y alerta a los agricultores en caso de que estas representen un riesgo a las condiciones óptimas de crecimiento y producción de los tomates. Este proyecto puede ser de gran relevancia para el sector agrícola al ayudar a prevenir afectaciones en la calidad y la cantidad de la cosecha.

Palabras claves: IoT, invernadero, monitoreo, cultivo.

Abstract

Implementation of a Variable Monitoring System for Tomato Growing Greenhouses Based on IoT

The present thesis contains the development of an IoT-based monitoring system for tomato crops in greenhouses in the municipality of Garagoa-Boyacá. The project's progress requires the achievement of the following objectives: selection of necessary monitoring devices, development of a supervision and data acquisition system, and design of a user interface. These objectives are key to the proper development and operation of the monitoring system.

The general objective of the project was to implement an IoT-based system for monitoring physical variables in tomato crops in greenhouses. The system will ensure optimal growth and production conditions for the tomatoes, contributing to the sustainable development of the agricultural sector.

To achieve the set objectives, an applied research methodology was used, divided into three phases: network architecture design, programming algorithm development for sensor control, and creation of the graphical interface. This methodology allowed a structured and organized progress of the monitoring system.

In conclusion, the implementation of the IoT-based monitoring system for tomato crops in greenhouses enables the tracking of relevant environmental variables in the cultivation process and alerts farmers in case of risk to optimal growth and production conditions for the tomatoes. This project can be of great relevance to the agricultural sector by helping to prevent damage to the quality and quantity of the harvest.

Keywords: IoT, greenhouse, monitoring, crop.

Introducción

En la actualidad, la tecnología se ha convertido en una herramienta esencial para mejorar la productividad y eficiencia en la agricultura, lo cual es de vital importancia para afrontar la demanda de comida global que aumenta cada vez más (Tovar et al., 2019). La implementación de sistemas de monitoreo de variables basados en Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) en los invernaderos es una alternativa para mejorar el rendimiento de los cultivos, en particular de aquellos que requieren de condiciones climáticas específicas como es el caso del cultivo de tomates.

El presente trabajo de grado se enfoca en la implementación de un sistema de monitoreo de variables para invernaderos de cultivos de tomates basado en IoT, en el que se desarrolló una aplicación móvil para que el agricultor viera en tiempo real las variables de humedad y temperatura en el invernadero, con el fin de alertar ante cualquier cambio que pudiera dañar la cosecha.

Diversos estudios han demostrado las ventajas de implementar sistemas de monitoreo en tiempo real de variables como la humedad y la temperatura en los invernaderos, ya que permiten al agricultor tomar decisiones oportunas para proteger la cosecha. Según el boletín número 377 del Instituto de Investigaciones Agropecuarias; la implementación de estos sistemas contribuye a la reducción de costos en la producción y a la mejora en la calidad de la cosecha (Torres, 2017). Además, se tienen otros antecedentes útiles para este proyecto como lo son: el artículo “Agricultura de precisión con sensores inalámbricos”, en el que se usan diferentes técnicas asociadas a la agricultura de precisión para capturar datos que se procesan en un sistema experto para tomar decisiones con relación a la medición de variables como temperatura, humedad y presión atmosférica (Rojas et al., 2016). También se tiene la tesis “Sistema de monitoreo y control en tiempo real para un invernadero de tomate a través de un aplicativo móvil” en la que se diseñó e implementó un sistema de monitoreo y control en tiempo real de bajo costo para un invernadero de tomate, mediante la implementación de software y hardware *open source*, con el objetivo de registrar las variables físicas más importantes a fin de obtener las condiciones óptimas para los cultivos (Barrera, 2021).

Es importante aclarar algunas limitaciones que tuvo el proyecto, por ejemplo, en la medida de la humedad, ya que esta es una variable que, aunque por sí sola ya es un indicador del estado del invernadero, puede ser afectada por otras variables, como el coeficiente osmótico y el PH, las cuales no fueron tomadas en cuenta para este sistema. También es importante resaltar, que es el agricultor el responsable de tomar las medidas correctivas necesarias para regular el estado del cultivo una vez que la aplicación haya dado la alerta correspondiente.

Para el desarrollo del proyecto se estableció una estructura metodológica dividida en tres fases principales que permitieron cumplir con los objetivos planteados. Estas fases se exponen en el presente documento en los tres capítulos del mismo. En el primero se aborda el diseño de la arquitectura de red sobre la cual se basa el sistema de monitoreo. En el segundo capítulo se explica detalladamente el código utilizado para recibir los datos de los sensores y cómo estos se suben a una base de datos en la nube. Para finalizar, en el tercer capítulo se muestra el proceso de desarrollo de la interfaz gráfica para el monitoreo en tiempo real y a distancia del invernadero.

Diseño de la arquitectura de red

La arquitectura de red se diseñó con base en ciertos criterios para la selección de los materiales que se implementaron en el sistema y cómo estos se instalaron para cumplir con sus funciones.

Criterios de selección

Tabla 1

Criterios de selección de materiales

Criterio	Descripción
Rango	Debido a la importancia de medir las variables, los sensores deben contar con un rango de medición acorde a las necesidades.
Costo	Es un factor importante en el proyecto puesto que se desea desarrollar un sistema que sea asequible a los agricultores de la región de Garagoa.
Conectividad inalámbrica	Esta conexión es muy importante para la transmisión de datos en tiempo real a distancia.
Facilidad de instalación	Es importante seleccionar dispositivos que sean fáciles de instalar y configurar en el invernadero.
Consumo de energía	Un bajo consumo de energía puede ayudar a prolongar la vida útil de las baterías y, por lo tanto, a reducir su frecuencia de reemplazo

Fuente: Autoría propia.

Materiales y métodos

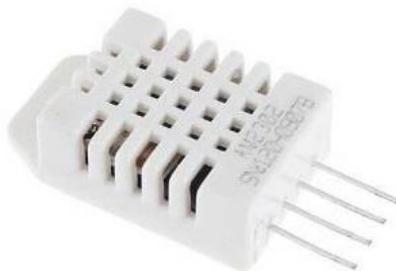
El sistema de monitoreo de variables físicas para invernaderos de tomates basado en IoT utiliza los siguientes materiales:

Sensores de temperatura y humedad DHT22

El DHT22 visto en la figura 1, es un sensor de alta precisión con una señal digital de salida. Este dispositivo está diseñado para medir la temperatura en un rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad en un rango del 0 al 100% RH (Humedad Relativa). El sensor utiliza un único bus de comunicación para enviar la información en formato digital, lo que lo hace fácil de integrar en proyectos basados en microcontroladores. El tiempo de respuesta del sensor es de 2 segundos y la precisión de medición es de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura y $\pm 2\%$ para la humedad. El sensor es adecuado para aplicaciones de monitoreo de temperatura y humedad en invernaderos, cuartos de crecimiento y sistemas de climatización, entre otros (Liu, s.f.). Por lo anterior, este sensor encaja perfectamente dentro del proyecto, ya que, al ofrecer una salida de datos en formato digital, garantiza una medición precisa de la temperatura y humedad relativa, a diferencia de los sensores análogos que al ser menos costosos presentan más variaciones en su medición.

Figura 1

Sensor DHT22



Fuente. Td Electrónica. (s.f.). *DHT22 Sensor de Humedad*. (<https://tdelectronica.com/producto/sensores/sensor-de-humedad-dht22/>)

Sensor de humedad del suelo resistente a corrosión

Es un dispositivo pensado para el control de humedad del suelo o tierra de plantas que utiliza un par de electrodos de acero inoxidable tal como se observa en la figura 2, que miden la humedad del suelo en un rango de 0 a 100%. Tiene una tensión de alimentación de 3.3V a 12V y una corriente de trabajo de 30mA. Tiene una salida digital y una analógica que puede ser

leída por un microcontrolador o un módulo de adquisición de datos. El sensor tiene una alta resistencia a la corrosión y puede ser utilizado en suelos salinos y alcalinos (Ferretrónica, s.f.).

Figura 2

Sensor de humedad del suelo

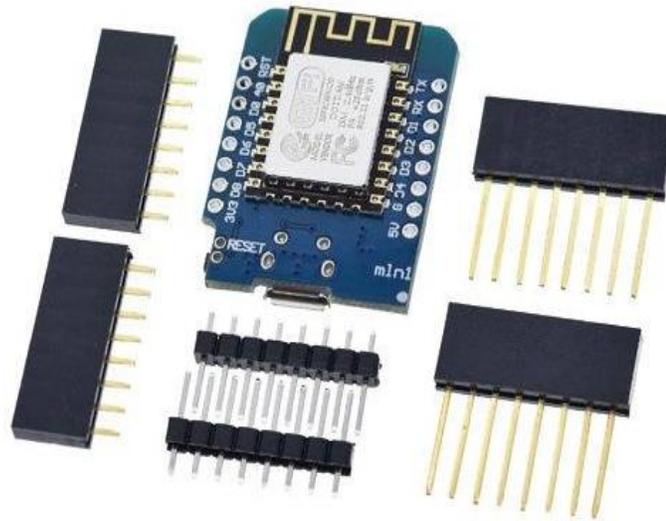


Fuente. Ferretrónica. (s.f.). *Módulo Sensor Humedad del suelo Resistente a corrosión*. (<https://onx.la/60e59>)

Debido al uso que tiene este dispositivo dentro del invernadero, es necesario disponer de un elemento protegido contra la corrosión que garantice su vida útil para evitar costos futuros por fallas en su funcionamiento producidos por deterioro físico del mismo.

Módulo Wifi Wemos ESP8266

Dispositivo compacto, diseñado para la conexión a internet a través de una red Wifi. Este módulo está equipado con un microcontrolador ESP-12, soporta comunicación TCP y UDP. El dispositivo cuenta con una memoria Flash de 4MB para el almacenamiento de datos y programas. Tiene un voltaje de trabajo de 3.3V a 5V y es compatible y fácil de programar con el IDE de Arduino. También tiene una interfaz USB para la alimentación y la programación (Ferretrónica, s.f.). Todo esto integrado en una pequeña tarjeta la cual se ilustra en la figura 3.

Figura 3*Módulo Wifi ESP8266*

Fuente. Ferretrónica. (s.f.). *Mini Modulo Wifi ESP8266 WeMos D1 ESP-12 Micro USB 3.3V - 5V*. (<https://acortar.link/W2k0qU>)

Las características de dicho dispositivo, lo hacen ideal para implementarlo dentro del proyecto, ya que ofrece múltiples aplicaciones y disposiciones como las de una placa Arduino, pero con la diferencia que es más económico y compacto que otras placas de desarrollo como Arduino nano que no ofrece una conectividad Wifi y que además es más costosa.

Módulo de comunicación inalámbrica NRF24LO1+LAN+PA

El módulo NRF24LO1+LAN+PA es un instrumento de comunicación inalámbrica que se utiliza para la transmisión y recepción de datos en sistemas basados en IoT. Este módulo tiene una frecuencia de trabajo de 2.4GHz y puede alcanzar velocidades de transmisión de hasta 2Mbps. El dispositivo utiliza la tecnología de modulación GFSK para la transmisión de datos y cuenta con un rango de transmisión de hasta 1000 m en espacios abiertos. El módulo está equipado con un amplificador de potencia (PA) y un amplificador de bajo ruido (LNA) para mejorar la calidad de la señal y aumentar la distancia de transmisión. También cuenta con un interruptor de antena para seleccionar entre la antena interna y una externa opcional (Nordic

Semiconductor, 2007). Dicho dispositivo se puede observar en la figura 4, en donde se puede apreciar el tipo de antena, la cual está cubierta de plástico, lo que la protege de la humedad y a su vez, permite un potenciamiento de la señal de radiofrecuencia, lo que lo diferencia en gran medida de otros dispositivos disponibles en el mercado que ofrecen una cobertura mucho menor a un precio similar e incluso mayor.

Figura 4

Módulo NRF24LO1+LAN+PA



Fuente. Suconel. (2021). *Módulo inalámbrico NRF24LO1+PA+LNA con antena SMA.* (<https://suconel.com/product/modulo-inalambrico-nrf24101palna-con-antena-sma-nrf24101pa/>)

Funcionamiento

El sensor de temperatura y humedad DHT22 y el sensor de humedad del suelo resistente a la corrosión, son los encargados de medir la humedad y temperatura del invernadero. El módulo Wifi ESP8266 es el encargado de recolectar los datos de los sensores y enviarlos al nodo receptor. Para la comunicación inalámbrica entre los nodos, se utiliza el módulo NRF24LO1+LAN+PA. Por último, la base de datos en tiempo real de *Firebase* es utilizada para el almacenamiento de los datos recolectados por los sensores que posteriormente serán visualizados en la aplicación móvil.

Diseño de la arquitectura de red

La arquitectura de red del sistema de monitoreo de variables en el invernadero, se compone de dos nodos: el nodo sensor y el nodo receptor.

Nodo sensor

El nodo sensor es el encargado de recolectar los datos de los sensores y enviarlos al nodo receptor. Para esto, se utiliza el módulo Wifi, el cual se encarga de leer los valores de los sensores y enviarlos al nodo receptor mediante el módulo de comunicación inalámbrica NRF24LO1+LAN+PA.

El módulo Wifi ESP8266 se conecta a los sensores a través de sus pines de entrada/salida (I/O) y es capaz de leer los valores de los sensores mediante las librerías correspondientes. Para el sensor de temperatura y humedad DHT22, se utiliza la librería *DHT.h*, que permite la visualización de los datos leídos y para el sensor anticorrosivo de humedad relativa de suelo, se emplea un mapeo de datos en la entrada análoga, el cual admite la lectura de los valores de humedad en el suelo.

Nodo receptor

Es el encargado de recibir los datos enviados por el nodo sensor y almacenarlos en la base de datos en tiempo real de *Firebase*. Para esto, se usa otro módulo NRF24LO1+LAN+PA conectado a otro módulo Wifi que se programa en el IDE de Arduino.

Firebase proporciona una API para la conexión y escritura de información en su base de datos en tiempo real. Para la conexión con *Firebase*, por parte del módulo Wifi, es necesario utilizar la librería *FirebaseESP8266.h*. Una vez conectado a la plataforma, los datos recolectados por los sensores, son escritos en ella mediante la función *Firebase.setFloat*.

Base de datos en tiempo real de firebase

Firestore es una plataforma de desarrollo de aplicaciones móviles y web, que proporciona una variedad de herramientas y servicios para el desarrollo de aplicaciones de alta calidad. Su servicio de base de datos en tiempo real permite el almacenamiento y sincronización de grandes cantidades de datos y ofrece una gran cantidad de funciones para la gestión de los mismos. Los datos se almacenan en formato JSON y se sincronizan con cada cliente conectado (Firestore, 2023).

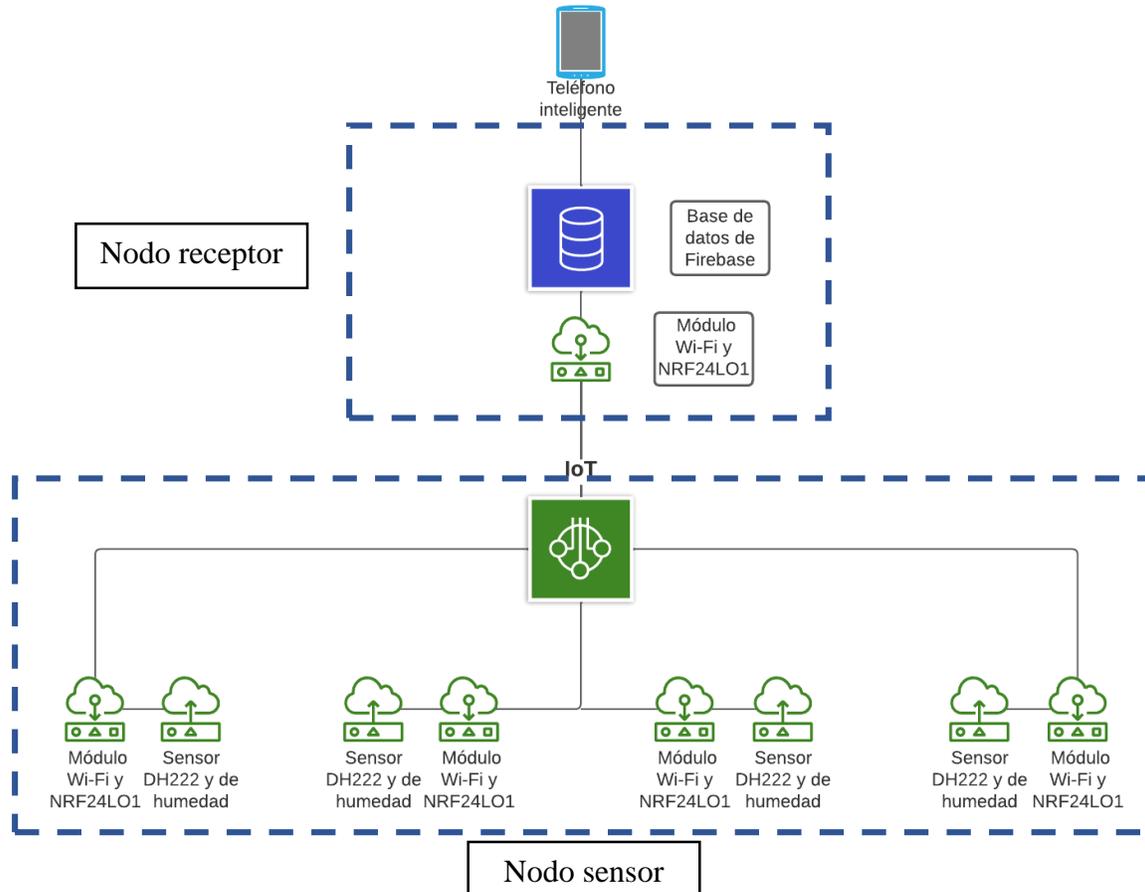
Esta base de datos se encuentra alojada en la nube y es accesible desde cualquier lugar del mundo con conexión a internet, lo cual la vuelve ideal para el desarrollo de la aplicación móvil en este proyecto.

Arquitectura de red

Finalmente, la arquitectura de red diseñada para el proyecto, consta de 4 sensores DTH22, cuatro sensores de humedad del suelo, cuatro módulos Wifi y cuatro módulos de comunicación inalámbrica conformando el nodo sensor, esto con el fin de tomar una cantidad de medidas adecuada para sacar el promedio de temperatura y humedad del suelo y del ambiente en todo el invernadero. Por otra parte, el nodo receptor solo cuenta con un módulo Wifi, un módulo de comunicación inalámbrica y la conexión a la base de datos, tal como se observa en la figura 5.

Figura 5

Arquitectura de red



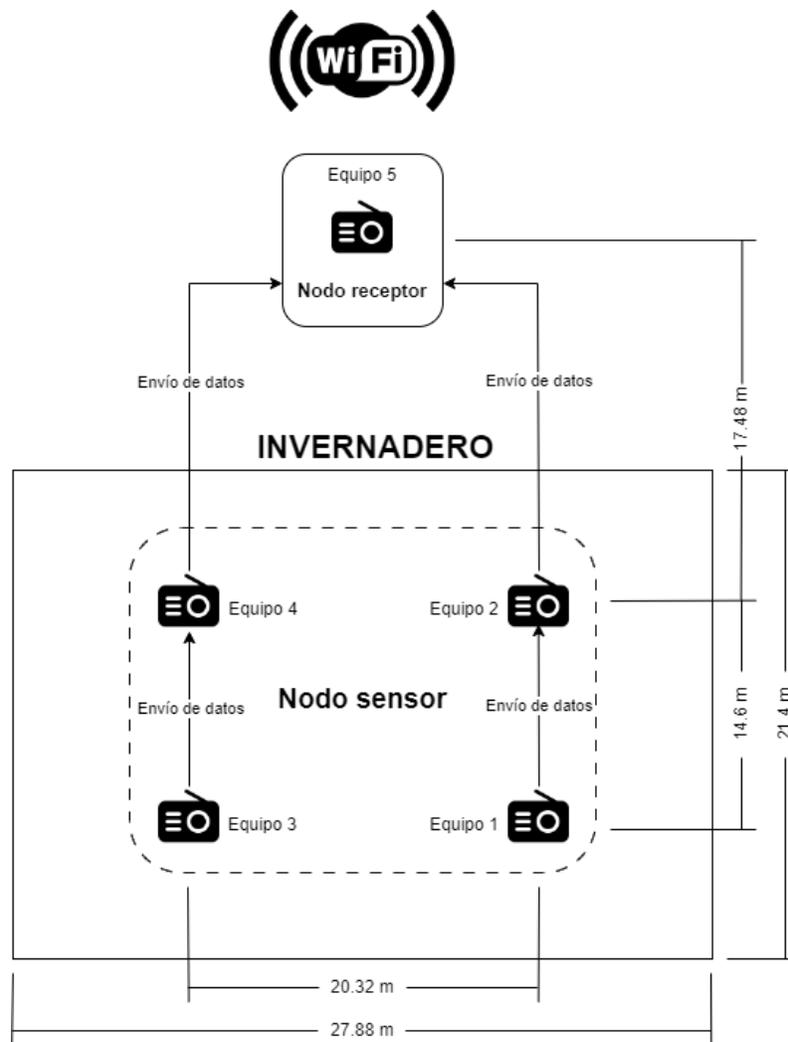
Fuente. Autoría propia (2023). *Arquitectura de red para el sistema de monitoreo*. Lucid chart (https://lucid.app/documents#/documents?folder_id=recent)

Desarrollo del algoritmo de programación para el control de los sensores

Para el proyecto se hizo uso de cinco equipos (los cuales se muestran en las figuras 7 y 8), cuatro constan, cada uno de un sensor DHT22, un sensor de humedad de suelo resistente a la corrosión, un módulo Wifi y un módulo NRF24L01 para la comunicación por radiofrecuencia entre los demás equipos.

Figura 6

Dimensiones del invernadero y posicionamiento de los equipos



Fuente: Autoría propia.

Dos de los cuatro equipos denominados como nodo sensor están ubicados en la parte inferior del invernadero tal como se observa en la figura 6, dicha zona es la más alejada de la conexión a internet Wifi por lo que estos dos equipos fueron configurados para funcionar únicamente como transmisores para enviar los datos de temperatura y humedad leídos por los sensores acoplados a estos. La transmisión se llevó a cabo por un canal hexadecimal de 64 bits hacia los otros dos equipos ubicados en la parte superior del invernadero los cuales son los equipos 2 y 4, dichos equipos se encuentran más cerca al equipo 5 considerado nodo receptor, el cual se encuentra junto a la conexión Wifi, los equipos 2 y 4 están configurados como receptores y transmisores para poder enviar los datos recibidos de los equipos 1 y 3 y así mismo los obtenidos por los mismos, hacia el equipo cinco, el cual está ubicado lo más cerca posible a la conexión Wifi para garantizar una conectividad estable para el envío eficiente de los datos a *Firebase*.

Figura 7

Interior del equipo de monitoreo



Fuente: Autoría propia.

Figura 8

Exterior del equipo de monitoreo



Fuente: Autoría propia.

Por lo anterior, cada equipo debe contar con un código diferente dependiendo de la función que cumple; es por esto que a continuación se observa la programación contenida en cada uno de los distintos equipos.

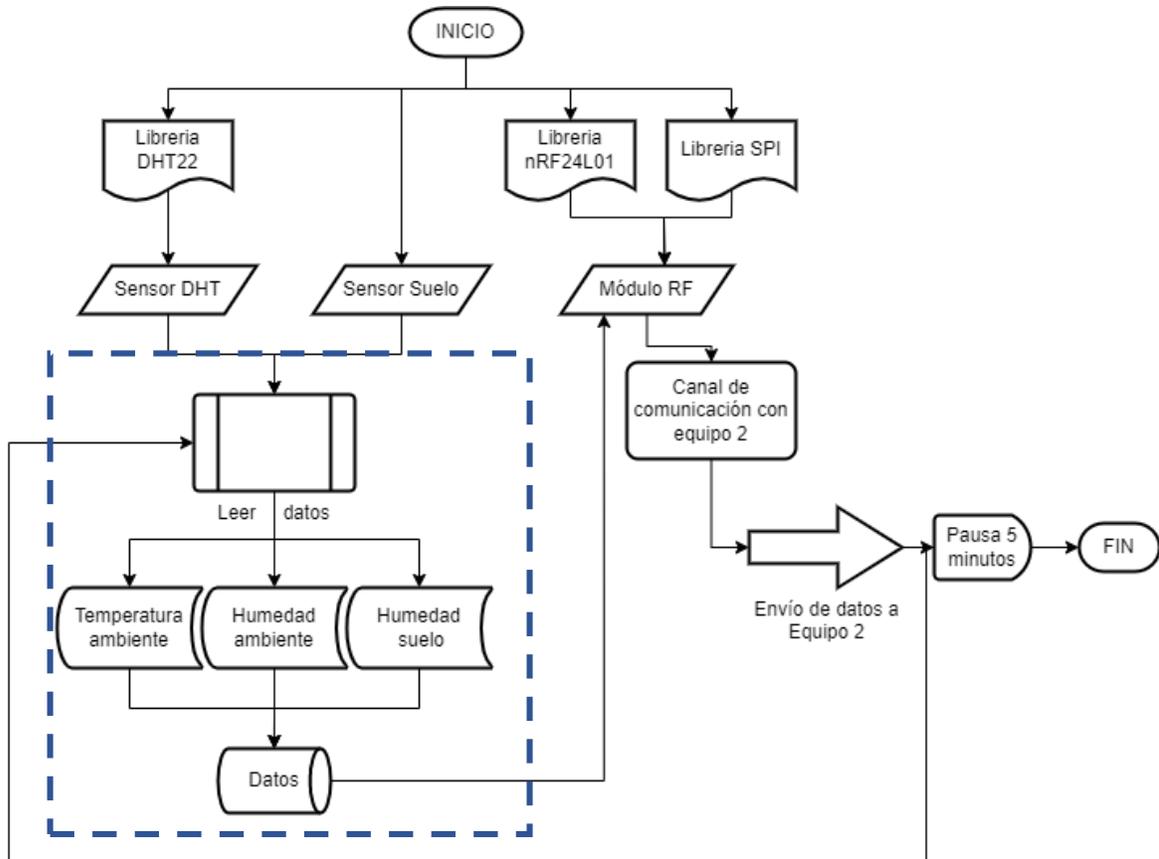
Equipo 1

En la figura 9 se observa el diagrama de flujo para el equipo 1 donde inicialmente se incluyen las librerías necesarias para poder trabajar con los distintos módulos y sensores, estas librerías permiten configurar los módulos y sensores por medio de código estructurado ya preestablecido dentro de cada librería, para posteriormente ser modificado según la necesidad que genere cada sensor.

Seguidamente se define una entrada analógica y una entrada digital del módulo Wifi, las cuales funcionarán como entrada de datos para el sensor de humedad del suelo y el sensor DHT22 respectivamente. De igual manera, se declara al módulo NRF24L01 como accesorio para el envío de datos, teniendo en cuenta los pines de comunicación SPI del módulo Wifi y estableciendo un canal de comunicación hexadecimal de 64 bits para la transmisión de los datos.

Luego se establece una estructura de datos tal como se observa en el recuadro azul dentro de la figura 9, la cual tiene como tarea guardar los diferentes valores que van tomando cada uno de los sensores utilizados. Estos datos son leídos por medio de una función llamada leer datos, la cual tiene como objetivo guardar la información registrada por los distintos sensores en cada una de las posiciones de la estructura de datos previamente realizada. En dicha estructura se guardan las variables de temperatura, humedad relativa del ambiente y humedad del suelo, esta última se realiza por medio de un mapeo de datos que van desde 0 a 1023 para la resistencia interna del sensor y desde 0 a 100 para mostrar los datos directamente relacionados con el valor del voltaje medido desde el pin análogo A0, esto se hace con el fin de generar una equivalencia con los valores obtenidos por el sensor de forma análoga con una variación de entre 0V y 5V y como el dispositivo trabaja con una resolución de 10 bits, quiere decir que se obtendrán datos de 0 a 1023, pero como la humedad se trabaja entre 0% y 100%, se hace necesario realizar dicha conversión, lo cual es conocido como CAD (conversor análogo-digital).

El proceso anterior, se repite cada cinco minutos con el fin de prolongar la duración de las baterías.

Figura 9*Diagrama para el equipo 1*

Fuente: Autoría propia.

Equipo 2

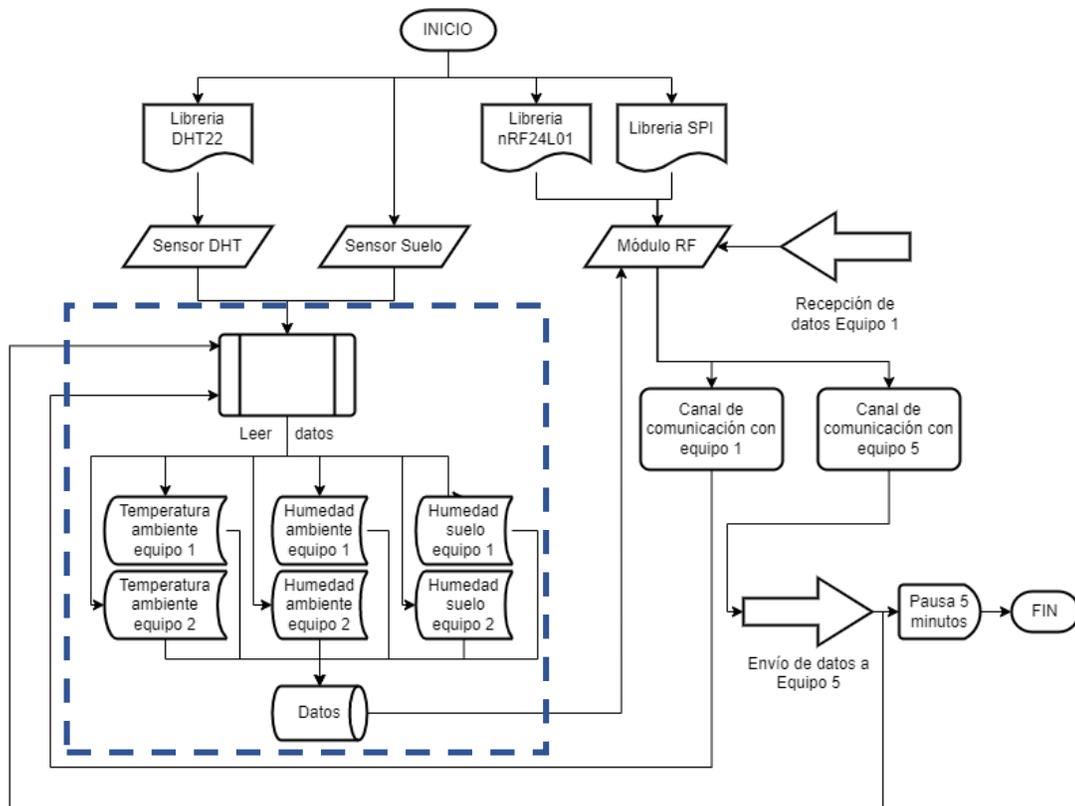
Para el equipo dos el código de programación es similar al del equipo uno tal como se observa en la figura 10, pero este se diferencia en los canales que maneja para la recepción y envío de datos junto con las estructuras para guardar los datos registrados por el mismo equipo y los recibidos desde el equipo uno.

Como el equipo dos va a funcionar como transmisor y receptor, es necesario declarar un canal para recibir y otro para transmitir, pero teniendo en cuenta que el canal para recibir debe coincidir en su totalidad con el canal creado para transmitir desde el equipo uno. Una vez se reciben los datos del equipo uno, estos son guardados en una estructura para seguidamente ser

enviada la información hacia el equipo cinco, de igual forma se crea una pausa de cinco minutos entre lecturas, con el fin de prolongar la duración de las baterías.

Figura 10

Diagrama para el equipo 2



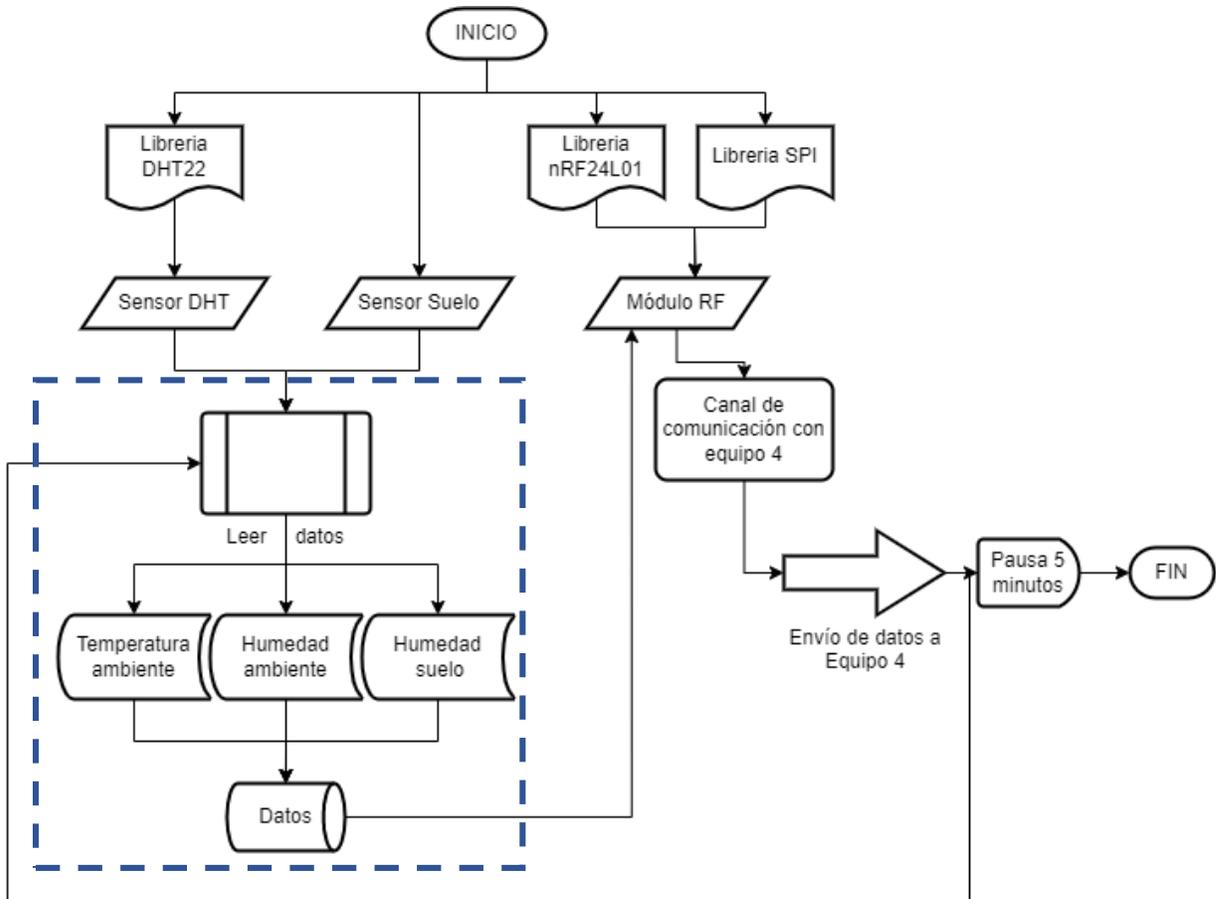
Fuente: Autoría propia.

Equipo 3

El código de programación contenido en el equipo tres, es similar al del equipo uno. A diferencia que este contiene un canal distinto para poder comunicarse con el equipo cuatro sin causar interferencias entre los demás equipos (ver figura 11).

Figura 11

Diagrama para el equipo 3



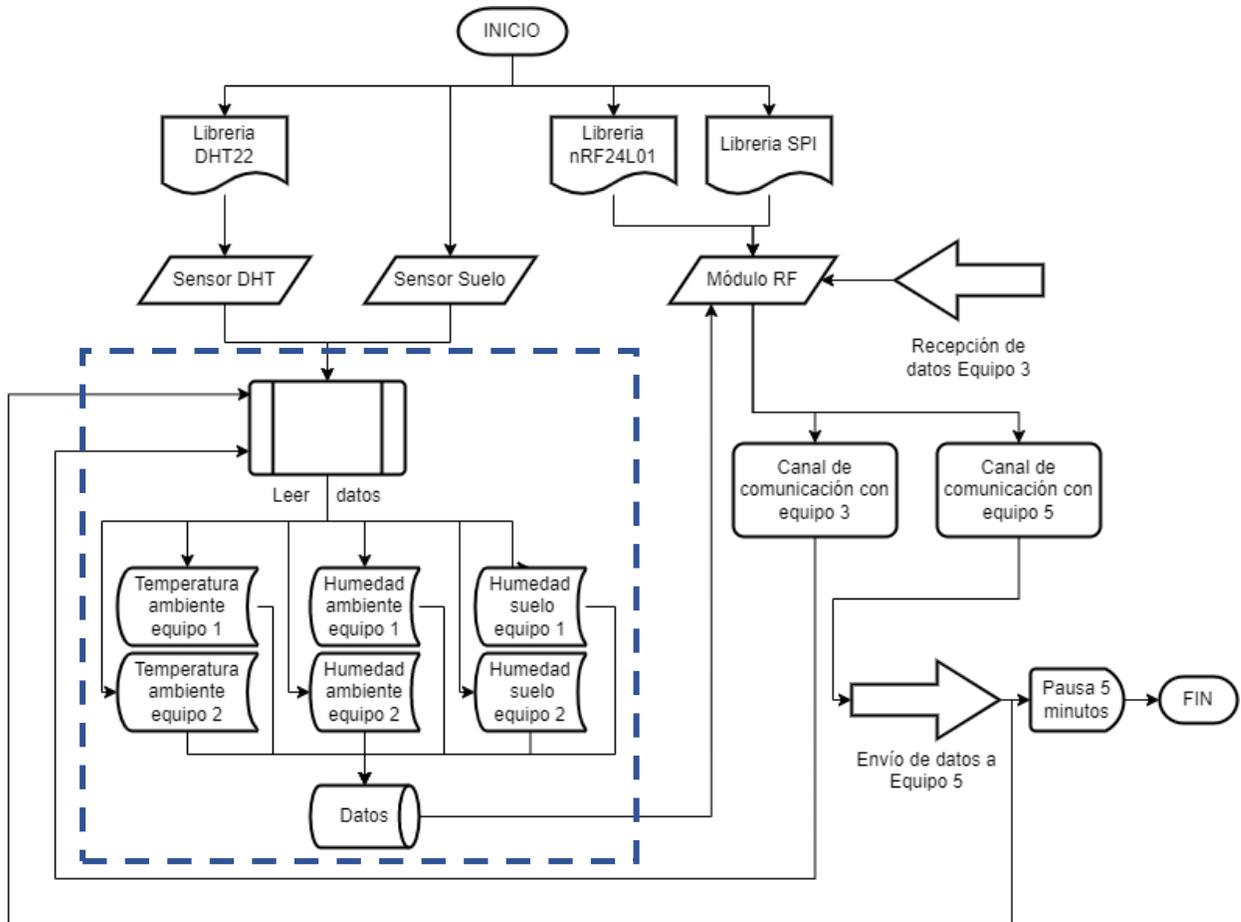
Fuente: Autoría propia.

Equipo 4

El equipo cuatro funciona de forma similar al equipo dos, diferenciándose en los canales de comunicación (ver figura 12).

Figura 12

Diagrama para el equipo 4



Fuente: Autoría propia.

Equipo 5

Para el equipo principal el código de programación cuenta con nuevas librerías y su funcionamiento se basa en la recepción de datos vía radiofrecuencia y al mismo tiempo, la transmisión de datos vía Wifi, para esto es necesario incluir las librerías de ESP8266 WIFI para permitir la conexión a internet del módulo Wifi, de igual manera se incluye la librería para *Firebase* para lograr interactuar con la plataforma y poder visualizar los datos enviados por el equipo en tiempo real.

Tal como se observa en la figura 13, se mantienen las librerías para el módulo de radiofrecuencia y se eliminan las del sensor DHT22 puesto que este equipo solo tiene como función recibir los datos y enviarlos a *Firestore*.

Seguidamente se define el host de comunicación entre el módulo Wifi y la plataforma de *Firestore* en donde se llama la dirección junto con la contraseña de acceso donde se creó el proyecto para habilitar la escritura de datos en la plataforma. Luego se establece el nombre de la red junto con la contraseña a la cual va a estar conectado el módulo Wifi para enviar los datos a internet.

De igual forma se mantiene la estructura para la recepción de datos del equipo dos y cuatro, pero en este caso esta estructura funcionara para la recepción de los datos de los dos equipos teniendo en cuenta el valor de la variable de tipo entero que se recibe para identificar de qué equipo provienen los datos recibidos.

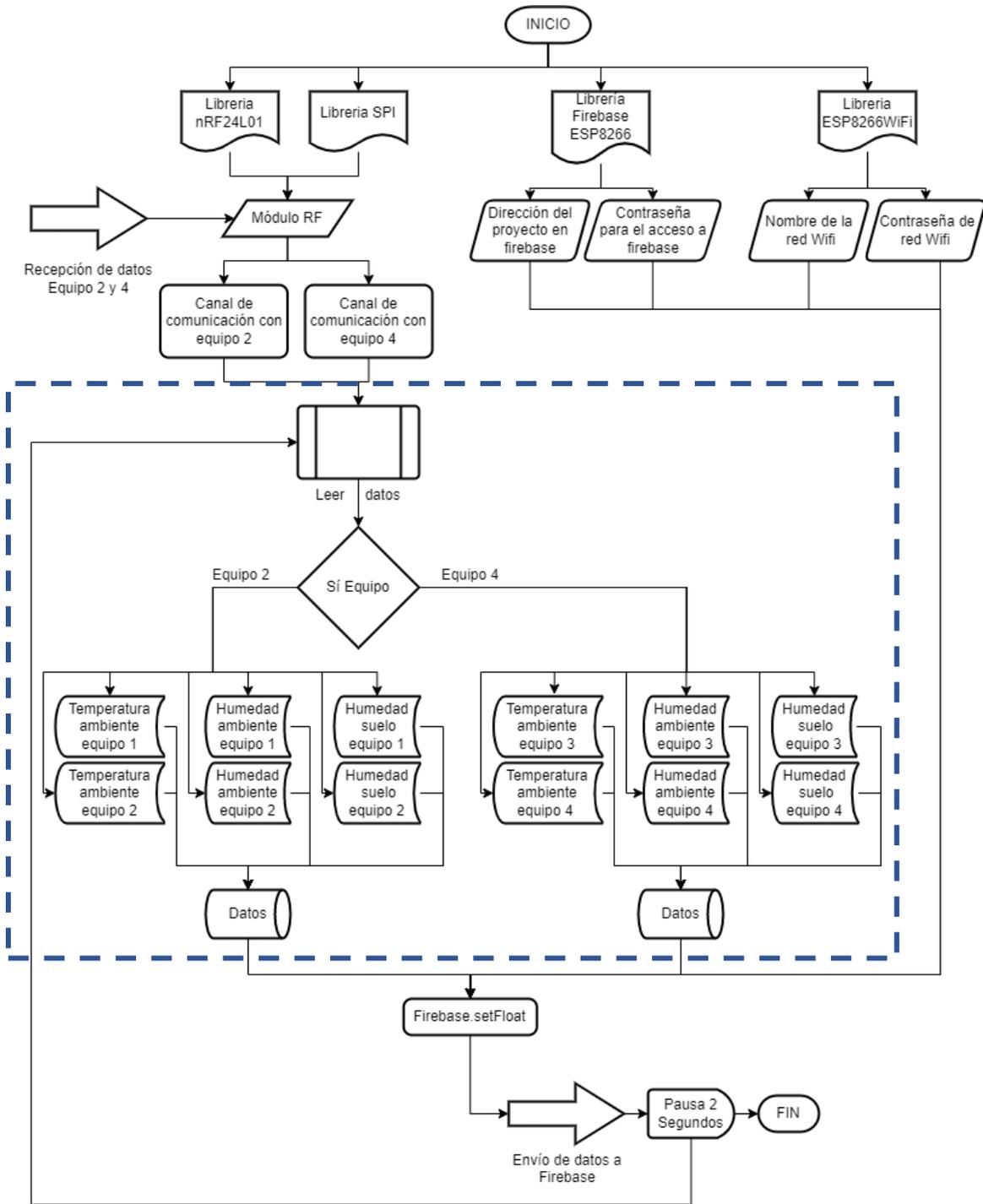
Se crean variables de tipo *float* para guardar en cada una de ellas los distintos valores de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo de los distintos equipos. Luego de esto, se empieza a trabajar con el código para la visualización de los datos en *Firestore* mediante la función *Firestore.SetFloat*.

Por último, dentro del bucle infinito, se crean dos condiciones *if*, una para cuando los datos provienen del equipo dos, por lo que, dentro de ella, se llaman cada una de las variables creadas anteriormente para guardar los datos recibidos en las mismas, teniendo en cuenta la identificación de cada variable y de cada equipo al que pertenece el dato adquirido. A diferencia de los demás equipos, éste tiene un retardo de solo dos segundos; esto se hace debido a que la recepción de datos desde el equipo cinco debe ser constante para cuando los equipos dos y cuatro envíen la información.

Lo anterior ocurre de igual forma dentro de la segunda condición *if* para cuando los datos provienen del equipo cuatro.

Figura 13

Diagrama para el equipo 5

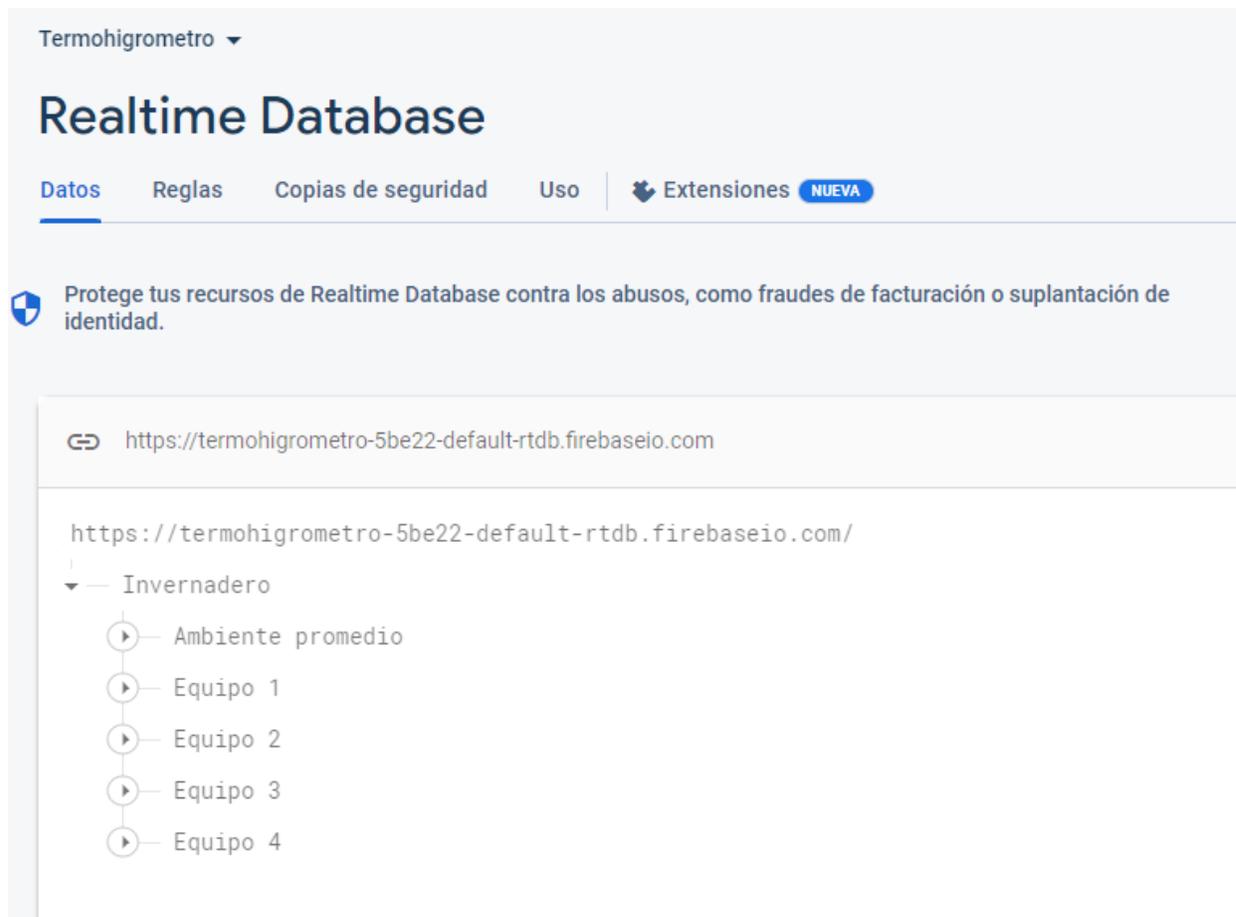


Fuente: Autoría propia.

En la figura 14, se puede observar los datos ya recibidos en *Firebase*, donde su función es de actuar como puente de comunicación entre el equipo cinco y la aplicación móvil.

Figura 14

Base de datos en Firebase



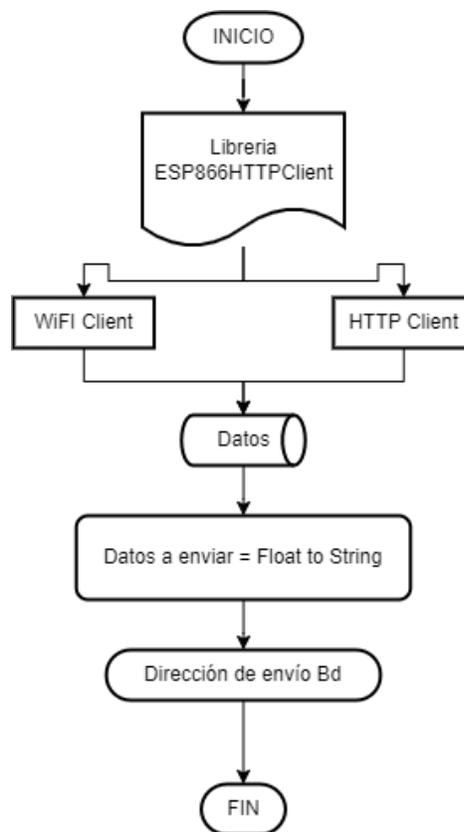
Fuente: Autoría propia.

Sumado a esto, dentro del algoritmo de programación para este equipo, se incluye de forma temporal y para efectos de las pruebas de funcionamiento, un apartado para el envío de datos adquiridos por los sensores hacia una base de datos que permitiera guardar los datos dentro de una matriz o tabla para posteriormente visualizar el comportamiento de las variables de temperatura y humedad con respecto al tiempo.

Para lograr lo anterior, se hizo uso de la conexión PHP y MySQL por medio de la librería ESP8266HTTPClient.h de Arduino con el fin de enviar un vector de tipo *string* desde el IDE de Arduino hacia MySQL para posteriormente ir guardando los datos en una tabla. Todo esto se logró mediante el uso del cliente de HTTP y mediante la conversión de los datos de tipo *float* a *string* tal como se observa en la figura 15.

Figura 15

Conexión ESP8266 con MySQL



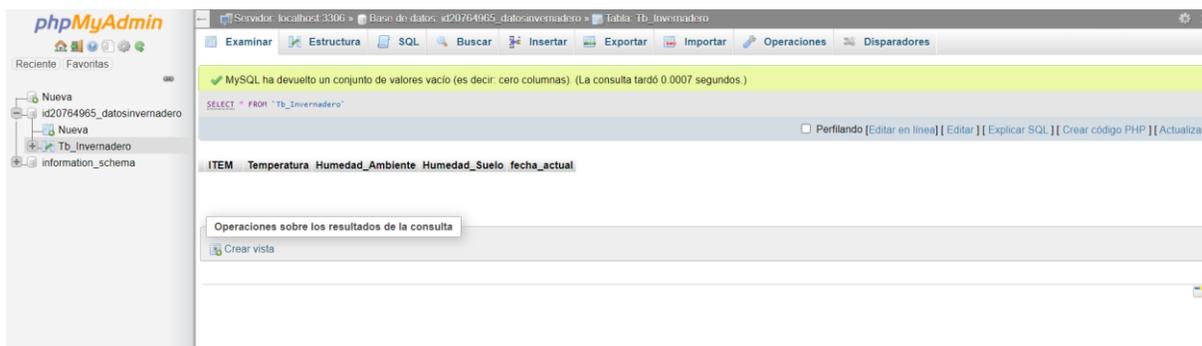
Fuente: Autoría propia.

Luego de esto, se creó una cuenta en el host *000Webhost*, el cual ofrece un alojamiento gratuito en PHP y MySQL perfecto para el almacenamiento de datos; seguidamente se creó un proyecto llamado *proyecto invernadero*, dentro de este, se establecen los parámetros a recibir, los cuales deben coincidir con los parámetros de transmisión por parte del módulo Wifi; al mismo tiempo, se crea la tabla con cada una de las descripciones correspondientes para la

temperatura, humedad ambiente, humedad del suelo y añadido a esto, se crea una columna para visualizar la fecha y hora en que se registró cada dato. En la figura 16 se observa la tabla creada, en donde inicialmente no se tiene ningún dato, puesto que aún no se efectúa la conexión con el módulo Wifi para la recepción de los datos.

Figura 16

Base de datos en MySQL



Fuente: Autoría propia.

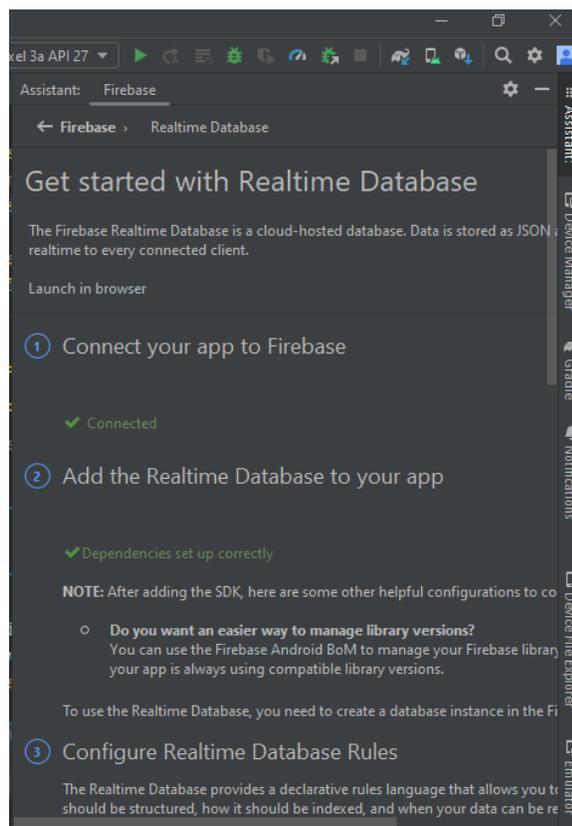
Desarrollo de la interfaz gráfica

En este apartado, se aborda el desarrollo de la interfaz gráfica, para observar las condiciones del invernadero, realizada en el entorno de desarrollo de Android Studio, debido a su enfoque en el desarrollo de aplicaciones para dispositivos inteligentes, lo cual resultaba una prioridad en el proyecto.

Una vez los datos eran almacenados en la base de datos en tiempo real, lo que quedaba por hacer era realizar la aplicación móvil para usuarios en la que pudieran apreciar estos datos de manera remota desde cualquier lugar con conexión a internet. Para esto, se conectó el proyecto de Android Studio a *Firebase*.

Figura 17

Conexión a Firebase



Fuente: Autoría propia.

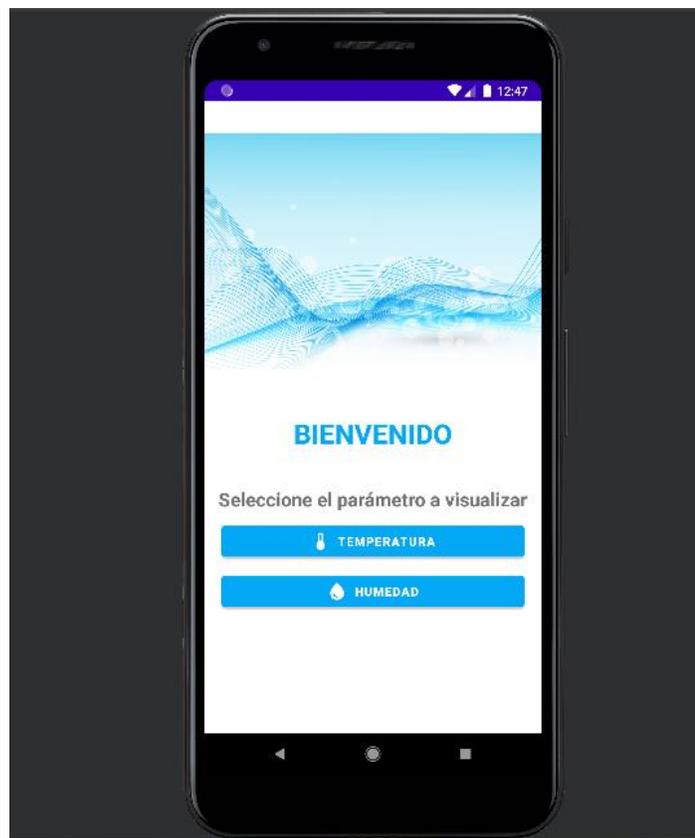
Para ofrecer una interfaz más intuitiva con el usuario se crean 3 clases, denominadas: “*MainActivity*”, “*TemperatureActivity*” y “*HumidityActivity*”. El proceso de programación de cada una de ellas, se detalla a continuación.

Main activity

La interfaz de esta clase, tiene la función principal de ofrecer la opción de visualizar las condiciones del invernadero, ya sean de temperatura o humedad.

Figura 18

Interfaz principal



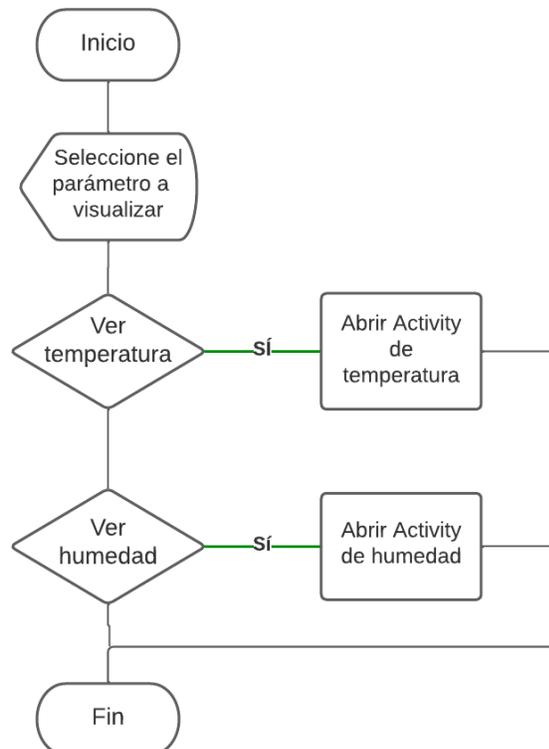
Fuente: Autoría propia.

Con base a la selección del usuario se habilita la clase requerida, para esto se configuran los *listeners* de manera que cuando se presione el botón se inicie la actividad indicada mediante

un *intent* y con el método *finish* se cierra la clase actual. Esto se plasma en el diagrama de flujo de la figura 18.

Figura 19

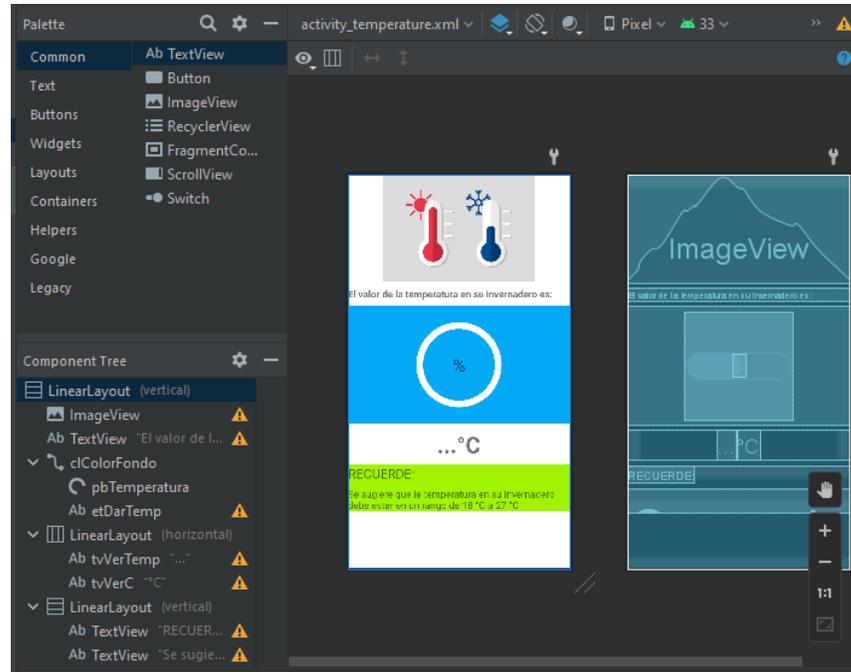
Diagrama de programación de botones



Fuente: Autoría propia.

Temperature activity

En este caso se hizo una interfaz que consta principalmente de una *ProgressBar* y dos *TextView* en los que el usuario puede observar claramente el valor de la temperatura en su invernadero al simplemente abrir la app en su celular.

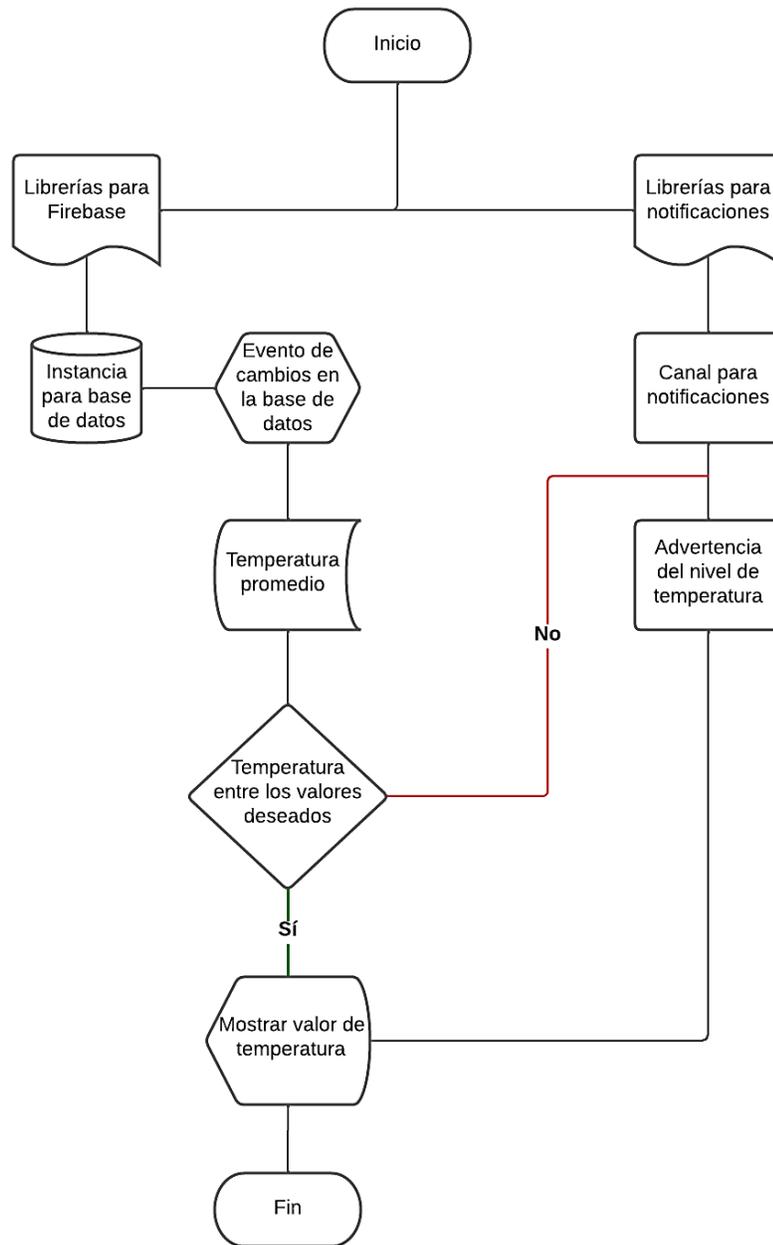
Figura 20*Interfaz de temperatura*

Fuente: Autoría propia.

Luego en la programación de la clase se empezó por realizar la conexión a la base de datos y añadir el método *OnDataChange*, con el fin de obtener el valor de la temperatura medida por los sensores y cambiar el valor de la misma en la aplicación cada vez que esta cambia de valor en el invernadero. También se llama a los métodos para cambiar el valor en la *ProgressBar* y para generar las notificaciones en caso de ser requeridas. Esto se observa, a grandes rasgos, en la siguiente figura.

Figura 21

Diagrama de programación de temperatura



Fuente: Autoría propia.

En el código se actualiza el estado de la *ProgressBar* dependiendo del valor de la temperatura promedio en la base de datos. Además, se cambia el color de fondo del

ConstrainLayout para simbolizar el estado del invernadero, cuando el valor de la temperatura es peligrosamente bajo para el cultivo, el color cambia a azul, si se encuentra en un rango adecuado es verde y si está muy alto, el color es rojo.

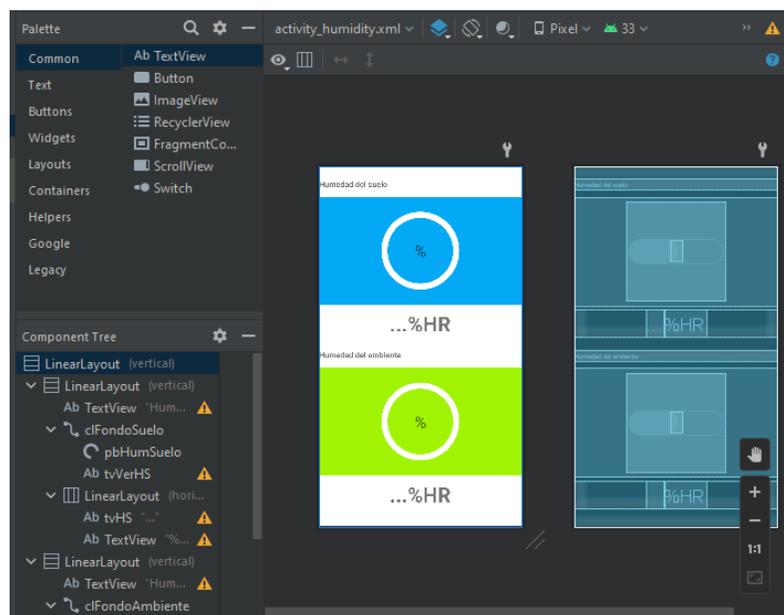
Para generar las notificaciones es necesario tomar el valor de la temperatura de la base de datos. Si el valor es menor que 18 °C se crea una notificación para dar la advertencia de la situación, lo mismo ocurre si el valor es mayor que 27 °C. Con el método *setPendingIntent* se crea una intención que se activa cuando el usuario toca la notificación, lo que lo lleva a la app para que pueda ver el valor exacto de la temperatura y con base en ella tome la decisión que considere pertinente para regular su invernadero y evitar problemas en la cosecha.

Humidity activity

Para la creación de esta interfaz se utilizaron dos *ProgressBar* y cuatro *TextView* para mostrar los valores de humedad del suelo y del ambiente en el invernadero.

Figura 22

Interfaz de humedades

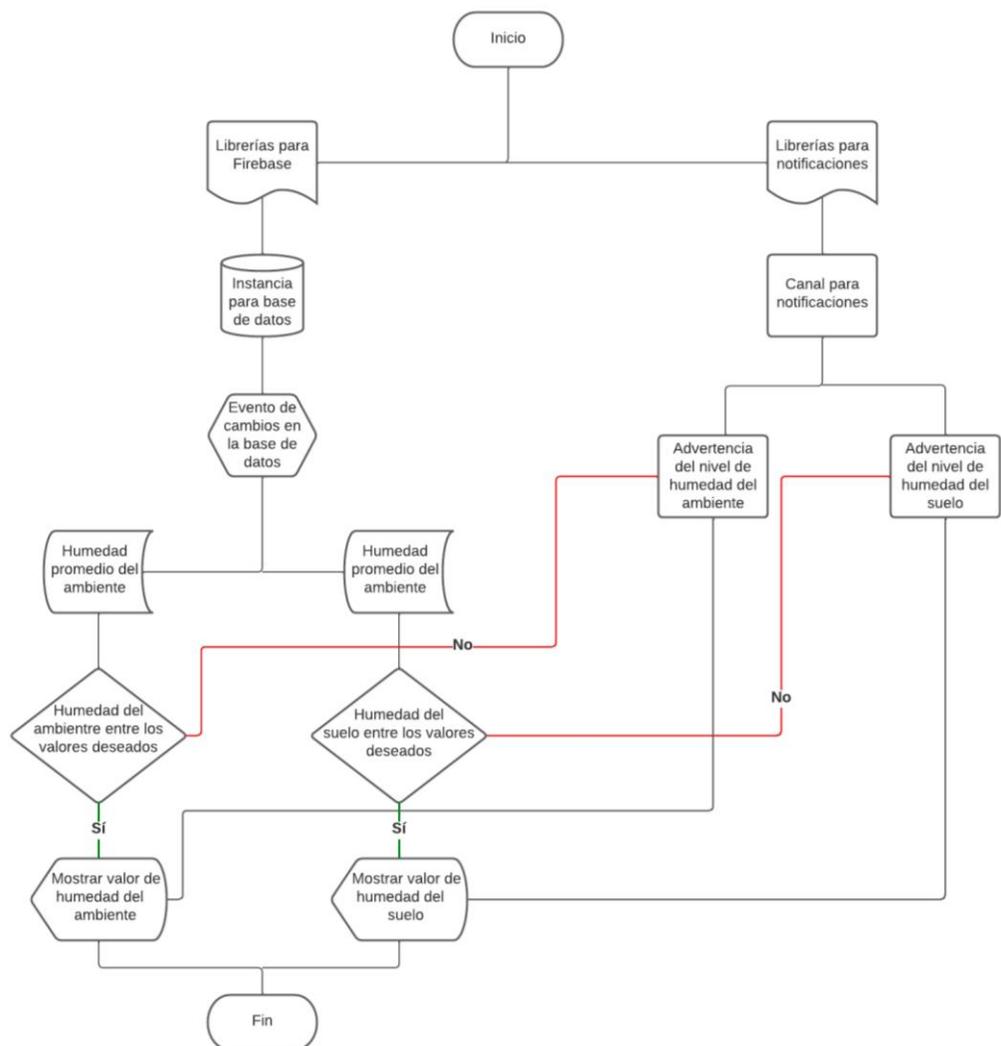


Fuente: Autoría propia.

En cuanto a la programación de la clase, es muy parecida a la realizada en la clase *TemperatureActivity*, pues se implementan los mismos métodos. Para iniciar se importan las librerías necesarias y se conecta a *Firebase* para recibir las actualizaciones de la base de datos en tiempo real. Cuando se produce un cambio en ella, se extraen los valores de las humedades y se actualizan en los *TextView* correspondientes.

Figura 23

Diagrama de programación de humedad



Fuente: Autoría propia.

Dependiendo del valor de las humedades en la base de datos, se llama al método para generar las notificaciones, si la humedad del ambiente o la del suelo están fuera del rango recomendado y se configuran para abrir la clase correspondiente cuando son pulsadas estas notificaciones.

Pruebas y puesta en marcha del proyecto

Con todos los elementos funcionando y conectados entre sí, se procedió a colocar los dispositivos de medición en el invernadero como se observa en la figura 24.

Figura 24

Ubicación de dispositivos



Fuente: Autoría propia.

Estos dispositivos se alimentan con tres baterías AA de 1.5V (figura 24), para que funcionen y puedan realizar la toma y envío de datos durante todo el día.

Figura 25

Baterías

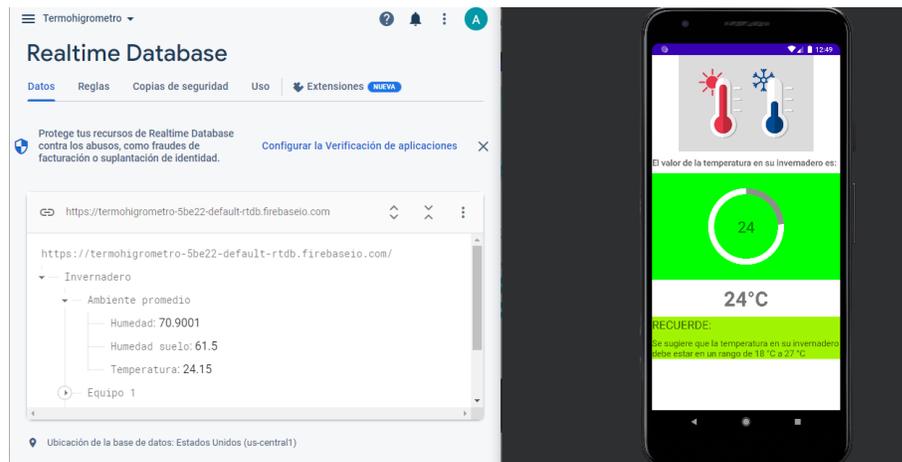


Fuente: Autoría propia.

El funcionamiento del sistema de monitoreo, vinculado a la app se puede apreciar en las figuras 26 y 27. Donde por medio de la conexión a la base de datos en tiempo real se observa como los datos cambian y se muestran en la pantalla de la aplicación.

Figura 26

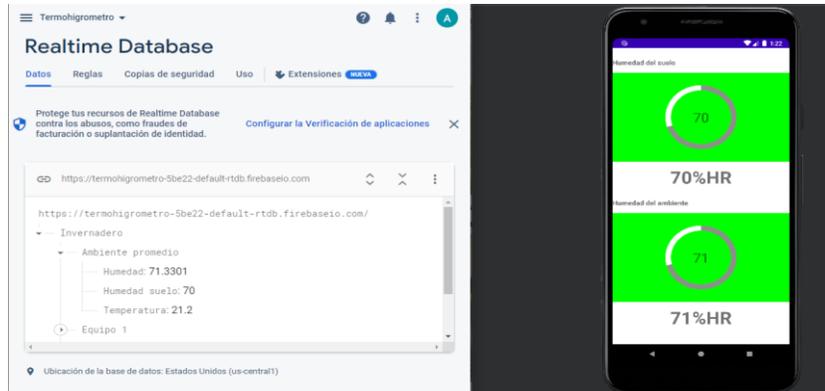
Funcionamiento de la pantalla de temperatura



Fuente: Autoría propia.

Figura 27

Funcionamiento de la pantalla de humedad

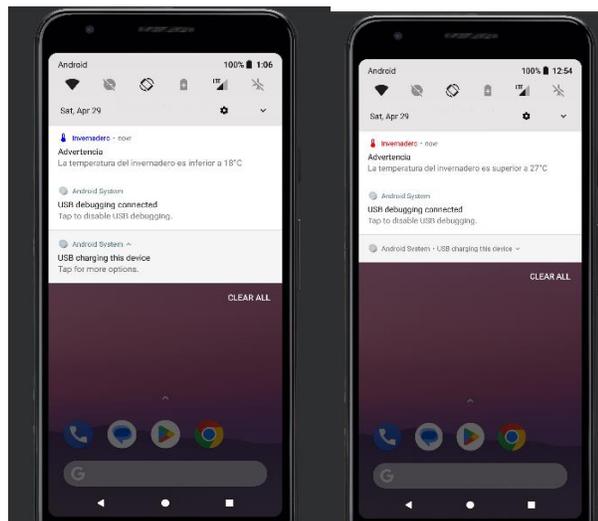


Fuente: Autoría propia.

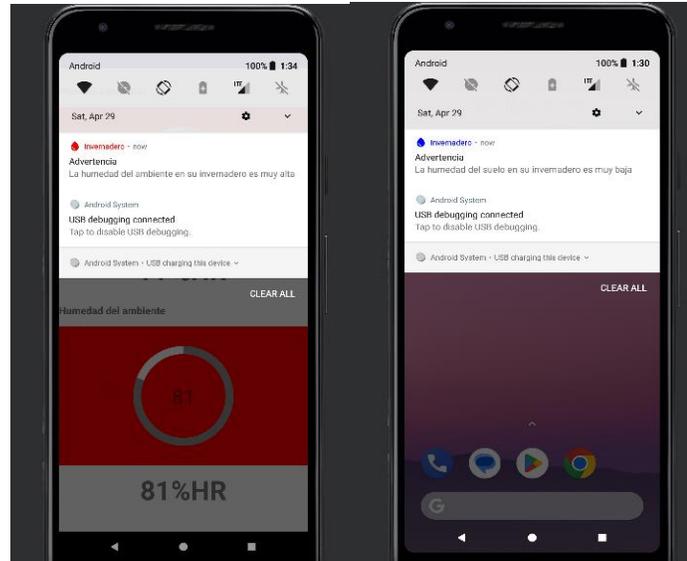
Cabe destacar la operación de las notificaciones locales generadas en Android. Cada vez que la temperatura, la humedad del suelo o la humedad del ambiente se salen de los estándares óptimos de rendimiento, se genera la alerta para el agricultor sobre posibles fallas en su invernadero que debe corregir para garantizar condiciones óptimas de producción en su cosecha de tomates.

Figura 28

Notificaciones de temperatura



Fuente: Autoría propia.

Figura 29*Notificaciones de humedad*

Fuente: Autoría propia.

Para finalizar, se visualizan los datos adquiridos en MySQL en donde como se observa en la Figura 30, ya aparecen valores de temperatura y humedad en la tabla que se había creado, estos datos son lo que se fueron grabando durante un periodo de funcionamiento de 5 días que como se observa en dicha figura, no se alcanzan a ver la totalidad de datos en una sola imagen, pero MySQL ofrece una gran alternativa a esto y es que la plataforma permite exportar los datos a archivos CSV los cuales pueden ser leídos en excel como se observa en la Anexo B.

Figura 30

Tabla de datos generada en MySQL

The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a MySQL database. The table 'Tb_Invernadero' is selected, and the columns are: ITEM, Temperatura, Humedad_Ambiente, Humedad_Suelo, and fecha_actual. The table contains 25 rows of data, with the first row highlighted in yellow. The data is as follows:

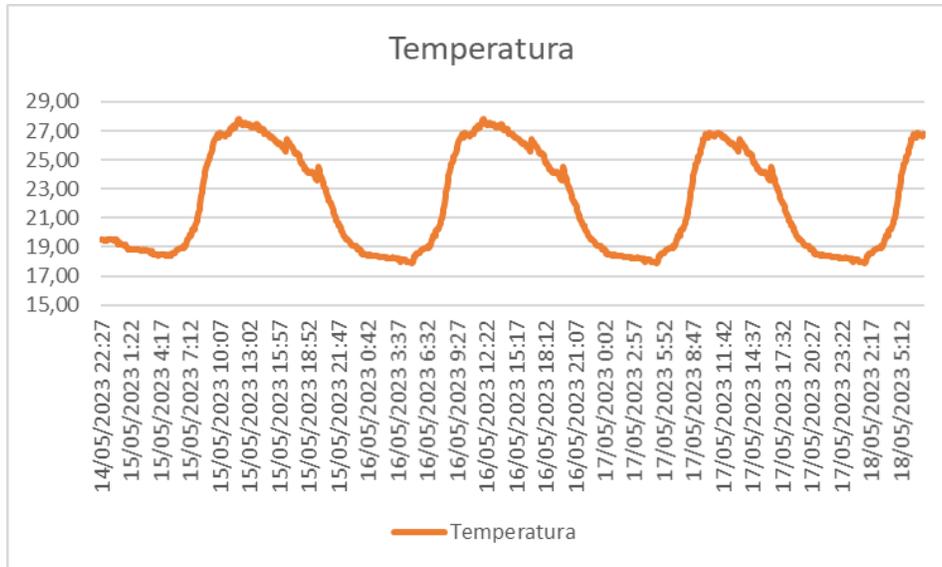
ITEM	Temperatura	Humedad_Ambiente	Humedad_Suelo	fecha_actual
248	25.9	66.5	51	2023-05-15 17:17:25
249	25.9	66.6	51	2023-05-15 17:22:25
250	25.7	66.8	51	2023-05-15 17:27:25
251	25.6	66.9	51	2023-05-15 17:32:25
252	25.5	66.9	51	2023-05-15 17:37:25
253	25.4	67	51	2023-05-15 17:42:25
254	25.5	67.1	50.9	2023-05-15 17:47:25
255	25.4	67.2	50.9	2023-05-15 17:52:25
256	25.4	67.2	50.9	2023-05-15 17:57:25
257	25.3	67.1	50.9	2023-05-15 18:02:25
258	25.1	67.2	50.9	2023-05-15 18:07:25
259	24.8	67.3	50.9	2023-05-15 18:12:25
261	24.8	67.5	50.8	2023-05-15 18:17:25
262	24.7	67.5	50.8	2023-05-15 18:22:25
263	24.6	67.5	50.8	2023-05-15 18:27:25
264	24.5	67.5	50.8	2023-05-15 18:32:25

Fuente: Autoría propia.

Al generar una gráfica del comportamiento con respecto al tiempo de cada una de las variables, se observa que la temperatura (figura 31) se mantuvo dentro del rango permitido para un cultivo de tomate que está entre 18°C y 27°C, de igual forma ocurrió con la variable de humedad del ambiente (figura 32) que se mantuvo entre 60% y 80% a diferencia de la humedad del suelo, la cual se salió del límite inferior recomendado, lo cual produjo, que se activen las notificaciones de la aplicación.

Figura 31

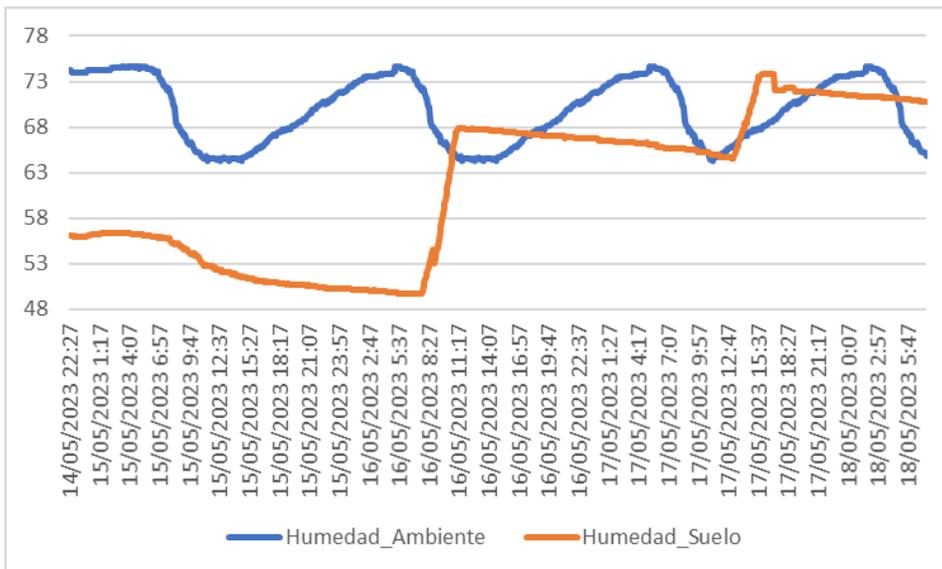
Gráfico de temperatura respecto al tiempo



Fuente: Autoría propia.

Figura 32

Gráfico de humedad del ambiente y humedad del suelo respecto al tiempo



Fuente: Autoría propia.

Conclusiones

La arquitectura de red establecida para el sistema permitió la recolección y transmisión de datos en tiempo real. Los dispositivos seleccionados cumplieron con la medición de las variables climáticas en el invernadero y su envío a través de una red inalámbrica eficiente.

La programación del algoritmo de control de los dispositivos permitió la automatización del sistema de monitoreo y la transmisión de los datos en tiempo real a *Firebase* gracias a la conexión inalámbrica implementada en los equipos, que al estar ubicados en distintas zonas del invernadero, garantizaron una amplia cobertura para el seguimiento de la humedad y temperatura, eliminando así, la necesidad del agricultor de acudir a su invernadero rutinariamente para comprobar las condiciones climáticas del mismo.

Por último, se puede apreciar, que la aplicación desarrollada posibilitó la visualización de los datos medidos en tiempo real y desde cualquier lugar con conexión a internet, lo que concede a los agricultores la facultad de monitorear las condiciones de sus cultivos en todo momento. Además, la generación de notificaciones locales cuando la temperatura o humedad pueda afectar la cosecha, es una herramienta valiosa, en la toma de decisiones informadas para la prevención de daños en la producción de tomates.

Para el municipio de Garagoa, se concluye que la medición de la humedad relativa es, de las variables medidas, la que más puede rebasar los límites recomendados para el cultivo, debido al alto porcentaje promedio (90%), que se presenta a lo largo del año. Por lo tanto, este proyecto es especialmente útil para alertar sobre los cambios que esta variable pueda presentar en los invernaderos de la región.

Referencias

- Barrera, D. (2021, 19 de noviembre). *Sistema de monitoreo y control en tiempo real para un invernadero de tomate a través de un aplicativo móvil*.
<https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/15451>
- Ferretrónica. (s.f.). *Módulo Sensor Humedad del suelo Resistente a Corrosión*.
<https://onx.la/60e59>
- Ferretrónica. (s.f.). *Modulo WiFi ESP8266 WeMos D1 ESP-12 Micro USB 3.3V - 5V*.
<https://onx.la/bc947>
- Firebase. (2023, 25 de marzo). *Firebase Realtime Database*.
<https://firebase.google.com/docs/database?hl=es-419>
- Liu, T. (s.f.). *Digital-output relative humidity y temperature sensor/module DHT22*. [PDF].
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>
- Nordic Semiconductor. (2007, Julio). *nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver*. [PDF].
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1489848/NORDIC/NRF24L01.html>
- Rojas, F., Lezcano, M., y Medina, F. (2016). Agricultura de precisión con sensores inalámbricos. *Memorias De Congresos UTP*, 1(1), 8-11.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1265>
- Torres, A. (2017). Manual de cultivo del tomate bajo invernadero. *Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. no. 377. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6708>
- Tovar, J., Solórzano, J., Badillo, A., y Rodríguez, G. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, (22), 86-105.
<https://doi.org/10.21501/21454086.3253>