

Diseño e implementación de un sistema IoT para monitorear cultivos

Autores:

Luis Alejandro Ariza García
Javier Alberto Ibáñez Bolaños
Juan David Morales Bautista

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director de grado:
Ing. Eduardo Rodríguez Mejía



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Colombia

Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de ingeniería
Departamento de electrónica
Bogotá, D.C. Noviembre, 2022

Agradecimientos

Agradecemos principalmente a Dios, por permitirnos llegar a este punto. A todas las personas que acompañaron y estuvieron involucradas en este arduo proceso. A nuestros padres que nos apoyaron durante tantos años y a quienes hoy dedicamos el fruto de un esfuerzo conjunto. A la Sra. Alicia Pulido y a su familia por abrirnos las puertas de su hogar para ampliar nuestro conocimiento y perspectivas sobre el agro colombiano, permitiéndonos desplegar este proyecto en su cultivo. A la Pontificia Universidad Javeriana por brindarnos los espacios, equipos y elementos necesarios para la investigación y desarrollo. A los profesores que nos extendieron su conocimiento durante toda la carrera, especialmente al Ing. Eduardo Rodríguez por su acompañamiento y compromiso. Por último, a nuestros amigos que estuvieron en los buenos y malos momentos.

Índice general

Índice general	3
1. Introducción.....	1
1.1. Problemática.....	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
1.2. Requerimientos.....	3
1.3. Restricciones	3
2. Revisión de literatura.....	3
2.1. Estado del arte	3
2.2. Marco teórico	7
2.2.1. Variables importantes para los cultivos.....	7
2.2.2. Fresa Albión.....	8
2.2.3. Modelo por capas de IoT.....	8
2.2.4. Protección IP	14
3. Propuesta y desarrollo de la solución	16
3.1. Descripción general.....	16
3.2. Diagrama de bloques.....	16
3.3. Diseño electrónico.....	17
3.3.1. Sensores de variables críticas	17
3.3.2. Selección de los sensores	17
3.3.3. Selección de módulos de comunicación.....	21
3.3.4. Selección de tarjeta de procesamiento.....	22
3.3.5. Selección de tarjeta de desarrollo	23
3.3.6. Selección de plataforma IOT.....	23
3.3.7. Selección de la pantalla	24
3.3.8. Consumo del sistema.....	24
3.3.9. Selección de la batería.....	25
3.3.10. Diseño de circuitos esquemáticos.....	25
3.4. Diseño de Interfaz gráfica local	28
3.5. Diseño del Software	28
3.5.1. Nodo inalámbrico	29
3.5.2. Nodo central	29
3.5.3. GUI local	29
3.6. Diseño del empaquetado	29
3.7. Analítica de datos	30
3.7.1. Descripción general.....	30
3.7.2. Análisis en tiempo real	31
3.7.3. Análisis de históricos	31
3.7.4. Máximos y mínimos relativos	31
3.7.5. Promedio en días anteriores	31
3.7.6. Tendencias.....	31
3.8. Desarrollo web	32
3.8.1. Descripción general.....	32

3.8.2.	Selección del host.....	32
3.8.3.	Diseño de la página principal.....	33
3.8.4.	Administración de usuarios.....	33
3.8.5.	Dashboard.....	33
4.	Implementación e instalación.....	34
4.1.	Descripción general.....	34
4.2.	Protocolo de pruebas	34
5.	Resultados	35
5.1.	Interfaz local.....	35
5.2.	Dispositivos finales	36
5.3.	Instalación en campo.....	37
5.4.	Analítica en la nube.....	39
5.4.1.	Tiempo real	39
5.4.2.	Históricos	40
5.4.3.	Máximos y mínimos relativos	41
5.4.4.	Promedios por día.....	43
5.4.5.	Tendencias.....	45
5.5.	Consumo del sistema.....	47
5.6.	Página web	48
5.6.1.	Principal	48
5.6.2.	Registro e inicio de sesión.....	49
5.6.3.	Interfaz gráfica web.....	50
5.7.	Riego	50
6.	Ánálisis de resultados.....	51
6.1.	Interfaz local.....	51
6.2.	Dispositivos finales	52
6.3.	Instalación en campo	52
6.4.	Analítica en la nube.....	53
6.4.1.	Descripción general.....	53
6.4.2.	Tiempo real	53
6.4.3.	Históricos	54
6.4.4.	Máximos y mínimos relativos	54
6.4.5.	Promedios por día.....	54
6.4.6.	Tendencias.....	55
6.4.7.	Ajuste para la humedad del suelo.....	55
6.5.	Consumo del sistema.....	55
6.6.	Página web	56
6.6.1.	Principal	56
6.6.2.	Registro e inicio de sesión.....	56
6.6.3.	Interfaz gráfica web.....	57
6.7.	Riego	57
7.	Conclusiones	58
8.	Trabajo futuro	59
9.	Referencias.....	59
10.	Anexos	61

10.1.	Protocolo de pruebas	61
10.2.	Código del nodo coordinador	61
10.3.	Código nodo inalámbrico	61
10.4.	Códigos de Analítica descriptiva.....	61
10.5.	GUI Local.....	61
10.6.	Códigos Página Web	61

1. Introducción

En el sector de la agricultura en Colombia y en el mundo se presentan desperdicios de alimentos desde su origen debido a la falta de tecnificación de los cultivos, esto sumado al comportamiento ascendente de la población mundial, desencadena el aumento en el porcentaje de personas con hambre, creando la necesidad de minimizar las pérdidas y aumentar la producción, para así reducir la escasez de comida en los sectores que se padece. En este sentido, a nivel nacional se presentan cifras donde la mayoría de los productores son campesinos con terrenos de pequeña extensión, y la calidad de los alimentos cosechados es solo proyectada para consumo local mas no para exportación, lo cual hace que sea necesario mejorar las condiciones y la tecnificación para estos sectores por medio de equipos que estén a su alcance, para mejorar la productividad y competitividad.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este proyecto se diseñó un sistema IoT (Internet de las cosas por sus siglas en inglés) para monitoreo de variables ambientales en cultivos, específicamente éste se desplegó en la vereda Arrayanes localidad de Usme, Bogotá, Colombia, donde se encuentra una finca dedicada principalmente a la producción de fresas tipo Albión, en la que también han participado algunas organizaciones tales como la Organización de las Naciones Unidas, la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, entre otras. La solución propuesta se integra por un nodo inalámbrico que cuenta con protección al agua y polvo, posee sensores de humedad y temperatura tanto del suelo como del ambiente, los cuales son el SHT31 y el DHT22 respectivamente, este cuenta con 4 baterías que brindan una autonomía de 179 horas. Esta tarjeta hace uso de una red con estándar ZigBee por medio de módulos XBee para realizar la conexión con el nodo coordinador, el cual cuenta con un ESP32 como tarjeta de desarrollo que envía a internet la información para realizar una analítica descriptiva en el servicio en la nube Thingspeak. Además, cuenta tanto con una interfaz local como una web, la primera se ubica en el cultivo para que el agricultor realice un monitoreo sin necesidad de conexión a internet, mientras que la segunda se encuentra en una página web que posee información relevante del proyecto y presenta la analítica realizada. Por otra parte, se registró el consumo hídrico antes de la implementación, que junto a la información recolectada permitió sugerir acciones preventivas y correctivas con base en un patrón de riego optimizando el comportamiento de este para que se mantenga en condiciones óptimas el estado de la cosecha.

1.1. Problemática

Según el informe “*Agriculture 4.0: The future of farming technology*” se espera que la población mundial para 2050 crezca cerca de 33% con aproximadamente 10 billones de personas, lo cual impulsará una demanda de alimentos 50% mayor a la producción agrícola de 2013 [1]. Adicionalmente, un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO (por sus siglas en inglés) [2] en 2019 asegura que en el mundo alrededor de 931 millones de toneladas de comida se desperdician en todo el mundo, donde 118 millones de toneladas corresponden a la cadena de distribución que incluye desde el agricultor hasta los distribuidores minoristas, lo que representa que el 14% de los alimentos en el planeta se desperdician durante su producción, lo cual es desafortunado ya que el 8,76% de la población actual padece de hambre, por lo tanto, para tratar de mitigar esta cifra es necesario aumentar la tecnificación de los agricultores, para que puedan proveer mayores cantidades de alimento al mercado reduciendo su desperdicio.

Por otra parte, en un contexto nacional el Ministerio de Agricultura de Colombia [3] asegura que para poder generar una apertura económica internacional de la agricultura colombiana y aumentar

la producción, la tecnificación de los cultivos y la implementación de nuevas tecnologías en estos es una de las principales condiciones que permitirían aumentar la productividad y competitividad. Sin embargo, el panorama en Colombia en materia agrícola no es alentador dado que según [4] ha disminuido la capacidad de abastecimiento por falta de asistencia técnica pues se mostró en 2013 con cifras del censo nacional que el 9.6% de los productores recibieron asistencia técnica en Colombia, siendo un escenario similar al que se tenía en 1954. Por lo que, si se continua con estas tendencias será inevitable una crisis alimentaria en el país, ya que en la actualidad el 54.2% de la población vive en inseguridad alimentaria y el 10.8% de los menores de 5 años tienen desnutrición crónica [5]. Según un reporte del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [6] las hortalizas son fuente de agua, vitaminas y fibra, con un bajo aporte calórico, entre estas se destaca el tomate, que ocupa el décimo lugar en importancia como producto alimenticio en el mundo. De otro lado, la producción de hortalizas en Colombia genera anualmente 350 mil empleos de los cuales 117 mil son empleos directos y 233 mil indirectos que contribuyen a la economía campesina del país, puesto que el 75% hacen parte de pequeños productores con predios menores a 3 hectáreas. Sin embargo, al ser únicamente orientada al consumo interno, la producción de hortalizas es poco exigente en calidad e inocuidad, por lo que se limita a las necesidades y exigencias de los consumidores colombianos, esto genera un lento desarrollo competitivo que se representa en bajos índices de exportación. Además, en el país se presentan alrededor de 30 tipos diferentes de cultivos de los cuales la mayor área se destina en arveja, tomate, cebolla de rama y de bulbo, zanahoria y ahuyama, que son cosechados en 32 departamentos y en más de 1000 municipios. Según el Instituto Colombiano Agropecuario [7] Los cultivos de hortalizas son extremadamente delicados y son altamente sensibles a condiciones climáticas adversas como fuertes lluvias prolongadas, por lo que, en época invernal, los terrenos se inundan y el oxígeno disminuye en el suelo lo que genera daños críticos a las plantaciones y por ende reducción en cantidades de producto final. Considerando la importancia de la agricultura en la cadena alimenticia, así como la necesidad de mejorar la competitividad con la productividad del sector agrícola en Colombia y en el mundo, cobra relevancia mitigar la falta de ayudas técnicas en los cultivos, con el propósito de producir mayores cantidades de alimento, esto justifica la implementación de un sistema IoT en cultivos, donde se monitoreen diferentes variables ambientales relacionadas al cuidado de las plantaciones, por medio de un análisis de dichas mediciones se le proporcionarán al agricultor oportunidades de mejora en sus cultivos, que le permitan incrementar la producción, reduciendo las pérdidas y desperdicios, así como la medición del consumo de recursos hídricos.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo general*

- Diseñar un sistema de monitoreo de variables ambientales en cultivos de hortalizas por medio de una plataforma *IoT*.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Determinar las tecnologías más adecuadas de monitoreo, comunicación y procesamiento de datos que conformen un sistema modular replicable según la dimensión del cultivo.
- Integrar las tecnologías seleccionadas en un prototipo que cuente con protección de agua y polvo, dadas las condiciones que supone un terreno agrícola.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario intuitiva, que permita la interacción en tiempo real entre los agricultores y el sistema.
- Medir la cantidad de recurso hídrico que consume un cultivo de hortalizas sin tecnificar, para optimizarlo una vez el sistema este implementado.

1.2. Requerimientos

Es de gran importancia conocer los requerimientos del sistema de monitoreo, ya que estos permiten identificar las características básicas con las que debe contar el dispositivo y con base en ello realizar un diseño adecuado. Es por esto que a continuación se presentan:

- El sistema debe medir la temperatura y humedad tanto del ambiente como del terreno del cultivo.
- Los umbrales de medición que generan algún tipo alarma o acción deben ser configurables según el tipo de hortaliza.
- Se deben realizar por lo menos 3 mediciones de las variables de interés en el transcurso de un día.
- Se solicita que los elementos situados en terreno abierto cuenten con una protección contra agua y polvo.
- Es necesario que la autonomía mínima del sistema sea de 168 horas.
- Los datos del cultivo deben ser presentados a los usuarios en tiempo real y mediante un registro histórico en el tiempo.

1.3. Restricciones

En cualquier tipo de sistema electrónico es fundamental conocer previamente los requerimientos o funcionalidades esperadas, así como también determinar las limitaciones que presenta. En este sentido, es importante resaltar que este dispositivo cuenta con las siguientes restricciones:

- El prototipo final instalado en el cultivo cuenta con un solo nodo inalámbrico debido al costo que representa cada uno de los dispositivos.
- La capacidad de almacenamiento en la nube está condicionada al servicio en la plataforma web que se elija.
- La interfaz gráfica local no posee un análisis de datos tan robusto como el que se presenta en el sitio web.
- El sistema debe contar con una conexión estable a internet para que pueda ofrecer sus funcionalidades completas.
- La distancia entre cada uno de los nodos de la red está restringida al tipo de tecnología de comunicación sea seleccionada.

2. Revisión de literatura

2.1. Estado del arte

En esta sección se presentan algunos sistemas de IoT en la agricultura, donde se pueden observar los elementos utilizados en términos de sensado, almacenamiento de información, comunicación, analítica y visualización de datos, entre otros. Con el objetivo de ajustar la solución propuesta por parte de los autores en términos de alcance y limitaciones, además de aprovechar dichos proyectos para identificar sus mayores ventajas y oportunidades de mejora.

Los autores en [8] presentan un sistema de agricultura inteligente de precisión llamado Smartnode, éste fue diseñado para medir la humedad del suelo, la temperatura y la luminosidad de un cultivo de tomate en Dagua, Colombia. Haciendo uso de un Arduino Atmega 2560, el cual se encarga de recibir las mediciones de los sensores y enviar los datos a un servicio en la nube donde posteriormente son analizados y procesados, para presentar la información de interés a los usuarios.

Este sistema hace uso del protocolo de comunicación Zigbee con topología de red en estrella, la cual garantiza un bajo consumo de energía a una distancia de aproximadamente 2 km entre los sensores y el sistema de adquisición de datos, estos sensores son de tipo WSN y cumplen características técnicas tales como una tasa de muestreo de 30 minutos, una corriente activa de 160 mA y una distancia real entre sensor y puerta de enlace de 0.5 km, con lo cual el sistema es capaz de abarcar una cantidad de terreno considerable sin el uso de muchos sensores, además se implementan dos arquitecturas de conectividad de software y sistema de adquisición debido a los territorios agrícolas en los cuales no hay conexión. Donde la primera se compone de un servidor y base de datos local, con la cual no es mandatorio la conexión a internet o telefonía celular para el almacenamiento de los datos. Por otra parte, la segunda arquitectura es mediante un sitio web y una app móvil para seguir en tiempo real las mediciones del cultivo, haciendo uso de una tarjeta sim móvil que cada 30 minutos envía los datos que recopila el nodo de sensado, estos datos una vez transmitidos son almacenados y procesados en el servidor web que gestiona una interfaz gráfica de usuario GUI (Por sus siglas en inglés) como se muestra en la figura 1 a continuación.

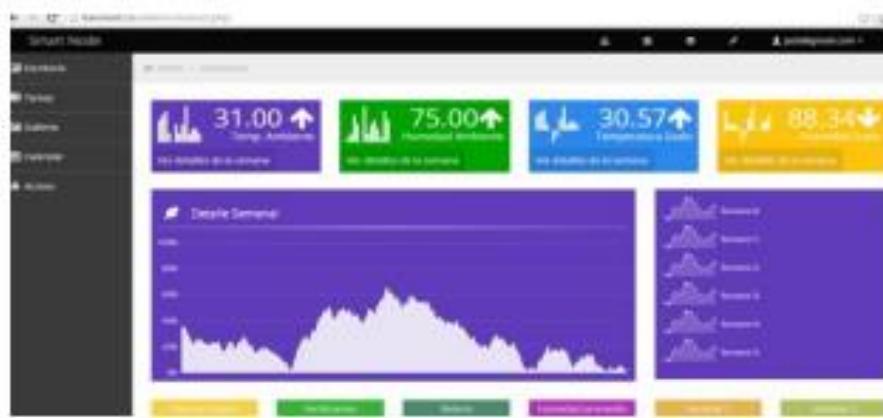


Figura 1. Interfaz gráfica de usuario en Smartnode. Tomado de [8].

Además de la implementación del sistema Smartnode en el cultivo de tomate, se realizó un modelo matemático cuyo objetivo es determinar en una función la productividad de la plantación, a partir de un análisis de regresión de las mediciones de los sensores por lo que se estimó que las pérdidas generadas sin el uso del sistema de agricultura inteligente son de 53% mientras que con la implementación de Smartnode es de 35%, reduciendo en un 18% este factor, lo cual si bien es un estimador bastante bueno en términos de resultados también es impreciso debido a que solo se tienen en cuenta las variables medidas por el sistema, ignorando aquellos parámetros de los cuales no se tiene control por parte de este tales como las plagas.

En conformidad con [9] se propone un sistema llamado Smart AgroTech basado en un desarrollo IoT en el contexto de la agricultura urbana, en esta implementación se considera la medición de variables ambientales como la humedad, temperatura y humedad del suelo. El sistema propuesto controla si la acción de riego debe comenzar o detenerse según las condiciones del terreno, por medio de una instalación de sensores y control remoto al propietario del cultivo. Por otra parte, los autores en [10] para elegir el microcontrolador, hicieron un análisis de ventajas y desventajas que supone escoger un sistema embebido, comparando entre un Arduino UNO, Raspberry Pi y un módulo ESP8266, eligiendo finalmente esta última opción que es una popular herramienta basada en IoT con un sistema en chip SOC (por sus siglas en inglés) y un módulo WiFi, que se conecta con otros dispositivos y se controla utilizando diferentes entornos de desarrollo integrado IDE (por sus siglas en inglés) como Arduino IDE, NetBeans, Eclipse, etc. Por otra parte, los sensores propuestos fueron

de lluvia o congelación, viento, pH, humedad del suelo y ambiental. Sin embargo, en el esquema propuesto solo se seleccionan los sensores de humedad del suelo y DHT11 que permite medir la temperatura y humedad ambiental, para reducir la complejidad y costo del sistema en general. En cuanto al control del riego se hizo uso de un módulo relé y aunque estos módulos funcionan a un voltaje de 5 V, se puede emplear para commutar en circuitos de alto voltaje actuando como un interruptor, en este caso para hacer la activación de la bomba de agua mediante el análisis de los datos medidos. El esquema descrito anteriormente, se presenta en la figura 1, donde se ven integrados todos los componentes que conforman la solución propuesta, allí los datos de los sensores se ilustran en el servidor web Thingspeak, en el que se presenta la temperatura, la humedad, la humedad del suelo y el estado de activación de la bomba de agua. Sin embargo, aunque los datos se muestran y se transmiten en la nube, esta información no es del todo útil ya que los que se muestran no cuentan con una estampa de tiempo, tampoco con un identificador que pueda dar información de qué dispositivo se está comunicando y estas graficas podrían mejorarse haciendo un tratamiento de datos dentro de la plataforma para presentar graficas históricas de las mediciones identificando valores máximos, mínimos, puntos críticos, etc.

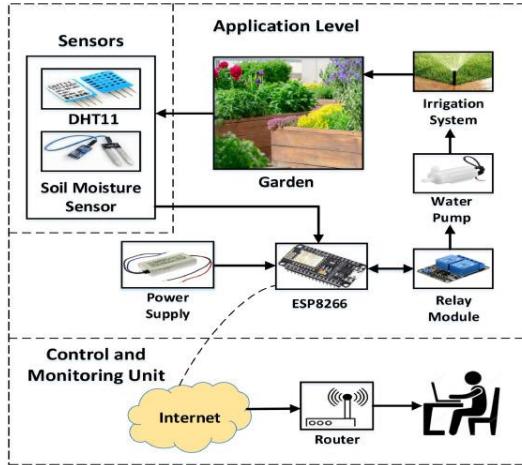


Figura 2. Esquema general de la solución. Tomado de [9].

Los autores en [10] analizan los diferentes tipos de control de actuadores que se pueden implementar en una solución IoT aplicado en el sector agrícola, siendo el primero por medio de un tiempo de control de bucle, el cual enciende o apaga los actuadores de manera periódica. Así mismo, se puede tener un control específico de tiempo donde el sistema puede configurarse para que sus actuadores estén encendidos durante un periodo de tiempo y apagado en otro, siendo útil para por ejemplo encender o apagar bombillas en el transcurso del día. Un tercer tipo de control es el de histéresis donde se identifican dos puntos de referencia para la medición, uno como límite superior y otro como inferior, con lo cual se establece un rango en el que la medición es óptima y en caso de sobrepasar uno de los límites el sistema activa o desactiva los actuadores. Finalmente, se puede dar un control condicional el cual establece más puntos de control dentro de las mediciones y permite la implementación de condiciones conjuntas entre mediciones, tal y como se realiza en la implementación del sistema general propuesto en el artículo. Teniendo en cuenta lo anterior, se diseña un sistema de agricultura inteligente que mide las variables de temperatura y humedad de un invernadero haciendo uso del sensor SHT21 el cual cuenta con una precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2\%$ RH, este es manejado mediante un Arduino Mega 2560 que actúa como plataforma de hardware para recibir los datos de las mediciones del sensor, los cuales a su vez son enviados a la nube por medio del chip WiFi ESP8266 y una vez recibidos en el servidor de Xively y Thingspeak son almacenados,

procesados y analizados para dar información de interés al usuario por medio de una interfaz gráfica como la que se muestra en la figura 2.



Figura 3. Interfaz gráfica de usuario del sistema. Tomado de [10].

La interfaz mostrada en la figura 3 se compone de una pantalla de tipo TFT de 3.5 pulgadas con resolución 480x320, en la cual los usuarios pueden ver los diferentes modos de control, como por ejemplo de histéresis o de tiempo de control de bucle, el primero de ellos con una gráfica en tiempo real relacionada con los puntos de referencia y el otro que se muestra mediante un círculo que con una coloración roja indica la proporción de tiempo que ha estado encendido el actuador. Además, el sistema propuesto por los autores en [10] brinda la opción a los usuarios de observar remotamente las mediciones en tiempo real de los sensores, esto mediante Thingspeak, el cual permite la escritura de datos en sus canales y los grafica tal y como se muestra en la figura 4. Sin embargo, esto es realmente de poca utilidad, ya que los datos graficados se muestran en función del tiempo de recepción y no en el de medición, por lo que además del retardo que se presenta en la comunicación del sistema con la plataforma, se puede tener perdida de datos transmitidos que no se podrán observar en este tipo de ilustraciones, al carecer de una estampa de tiempo en el envío de los datos, desde el sistema puesto en el cultivo que permita realizar graficas más elaboradas para los usuarios y con ello, poder también realizar históricos de hasta varios días.



Figura 4. Gráfica en tiempo real del sistema. Tomado de [10].

Según [11] la tecnología de sensores WSN es una de las tecnologías emergentes más importantes junto con el IoT, siendo esta primera el componente central de la segunda. Sin embargo, a pesar de presentar un alto grado de ventajas y campos de aplicación, este tipo de redes de sensores

deben ser diseñadas con especial cuidado, debido a que presentan requerimientos tales como: Bajo consumo, ya que, aunque muchos sistemas hacen uso de protocolos de comunicación de muy bajo consumo no es suficiente, puesto que los sensores generalmente disipan mucha potencia. Restricción de recurso, debido a que las redes de sensores usan baterías que limitan su uso, además de que el ancho de banda dado para ellos es limitado, por lo que la vida útil se reduce y debe diseñarse en conjunto estos parámetros para alargarla. Seguridad en la red, teniendo en consideración la disposición abierta de las redes de sensores para abarcar gran cantidad de espacio en los cultivos, son más susceptibles a posibles ataques en los cuales se ve afectado el mensaje que se envía de las mediciones. De igual manera, el artículo presenta el diseño e implementación de 9 nodos de sensores para 9 hectáreas de un cultivo, cada uno de ellos cuenta con una batería recargable de 6600mA con capacidad de recolección de energía solar, además de una caja con IP65 que resiste al agua, con una memoria SD para el almacenamiento de las mediciones, haciendo uso de una arquitectura de WSN centralizada donde los nodos de sensores no se comunican entre sí, sino se limitan a enviar la información a un centro de fusión FC (por sus siglas en inglés), a diferencia de arquitecturas como la descentralizada, en la cual no hay un FC sino que los nodos se comunican entre sí para luego enviar la información y las arquitecturas hibridas, que son una combinación de ambas. Con ello, se realizó el montaje del sistema en el terreno haciendo uso de un par de sensores capaces de medir la temperatura, la humedad y la salinidad en el terreno ya que cada nodo puede permitir operar hasta a 8 sensores de baja potencia, siendo es una ventaja del sistema, al poder caracterizar un cultivo con muchas variables. No obstante, la evaluación del sistema no fue la mejor debido a que para esto se escogieron tres de los nueve nodos puestos en el campo para evaluar la comunicación entre ellos y el FC, dando en uno de ellos una alta eficiencia de transmisión y en otro, fallas de interferencia debido a árboles y animales dentro del terreno, por lo que se debió implementar una adecuación mayor en campo para cada nodo, evitando que por ejemplo los animales se acerquen demasiado y evitando que el terreno entre los nodos y el FC tuviera presencia de árboles que provocan interferencia.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Variables importantes para los cultivos

Debido a la importancia de las hortalizas en la pirámide alimenticia de las personas, dado que son fuente de agua, vitaminas, fibra y de bajo aporte calórico [12], es necesario tener mayor productividad en los cultivos y dar respuesta al constante aumento en la demanda, a causa del crecimiento de la población en el mundo. Por ejemplo, en Colombia hasta el año 2016 las condiciones climáticas impactaron la producción hortícola, dando como resultado una tendencia descendente de la producción [13]. Teniendo en cuenta que las hortalizas son extremadamente delicadas y una condición adversa, como un elevado valor de la humedad, puede desarrollar en las plantaciones un déficit de oxígeno que, a su vez tiene como consecuencia el aumento en la aparición de microrganismos anaeróbicos [14], el suelo se convierte en un medio facilitador para que las plagas se propaguen, generando hongos e inclusive enfermedades víricas. Por otro lado, la temperatura debe ser controlada, tanto en cultivos en espacios abiertos como cerrados, dado que las altas temperaturas maximizan el crecimiento bacteriano y pueden causar quemaduras en hojas y brotes jóvenes [15]. Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO (por sus siglas en inglés) [16] para los cultivos de hortalizas como en el caso del pimiento, por ejemplo, las temperaturas influyen en el crecimiento y en la fertilidad donde las temperaturas por debajo de 10°C a 12°C o superiores a 35°C son desfavorables tanto para la plantación, como para el desarrollo del fruto. Así mismo, según un informe de la revista técnica Navarra Agraria [17] los cultivos de lechuga en invernadero se hielan con temperaturas por debajo de los -6 grados centígrados y detiene su desarrollo cuando se encuentran debajo de 5°C o por encima de 30°C. Su temperatura

ideal oscila entre 14°C a 20°C en el día y 10°C a 12°C en la noche y en el caso de la humedad relativa debe oscilar entre 60% y 80% para lograr un crecimiento ideal del cogollo.

2.2.2. *Fresa Albión*

Según [18] Albión es una variedad de fresa que fue diseñada por criadores estadounidenses en el estado de California, esta es el resultado de múltiples cruces entre diferentes variedades existentes en el mercado. Los requerimientos principales para esta variedad de fresa eran la resistencia a la mayoría de las enfermedades y la fácil adaptación al cultivo en cualquier condición climática. En el año 2006 el estándar de cultivo se formalizó y fue patentado en la Universidad de California, *Strawberry remontant Albión* es un fruto con forma ligeramente alargada, su peso oscila entre los 30 y 50 g, estos frutos suelen ser bastante elásticos, firmes y además son capaces de ser transportados a largas distancias. Aunque la fresa Albión es una de las variedades más fructíferas y apetecidas por su sabor es muy controvertida ya que requiere cuidado constante para obtener buenos rendimientos, la planta necesita una respuesta oportuna a los cambios de las condiciones climáticas así como cualquier otro cambio en los factores relacionados a su ciclo de vida, además cabe resaltar que la planta tiene poca resistencia a heladas así como a las sequías, por lo que estas necesitan un riego constante y es fundamental que la capa superficial del suelo siempre esté húmeda. Es importante resaltar que la variedad se caracteriza por su sabor, alta productividad, resistencia a la mayoría de enfermedades, buena conservación y transportabilidad, pero aun así presenta algunas desventajas, requiere un cuidado constante y un control de las condiciones ambientales, como lo son la temperatura y humedad tanto del ambiente así como del suelo en el que se encuentran sembradas, es un poco vulnerable a plagas y tiene baja tolerancia a las condiciones demasiado frías así como las condiciones demasiado cálidas, por lo cual es importante monitorear estos factores para tener una buena producción del fruto. Como se explica en [19], para lograr una fecundación ideal es imprescindible obtener una temperatura ambiente de 18°C y 25°C en las horas del día y entre 8°C y 13°C en las horas de la noche, con una humedad relativa entre el 60 y 75%. Dependiendo de la variedad de fresa, se debe procurar un clima mínimo vegetativo en el suelo de 2°C y máxima de 40°C, con una humedad relativa de 80 y 95% ya que valores mayores a estos pueden estar afectando la fructificación.

2.2.3. *Modelo por capas de IoT*

Para analizar en detalle las tecnologías IoT usadas en el campo de la agricultura, se realiza una clasificación mediante tres capas que pueden describir cualquier tipo de solución como se muestra en [20], que son: capa de percepción (captura), capa de red (transporte) y capa de aplicación (implementación) las cuales no están sujetas a un modelo específico para su definición, sino se presentan como una estructura para la implementación de los sistemas.

2.2.3.1. Capa de percepción

La capa de percepción se compone de diferentes dispositivos encargados de recolectar la información del entorno, en esta capa los parámetros físicos se “sienten” ya que estos son los encargados de alterar las mediciones de los sensores que se implementan y siendo conscientes de la gran cantidad de factores físicos que pueden ser monitoreados es necesario acotarlos [21], clasificando el impacto que tienen en un sistema de agricultura IoT. Debido a esto existe una gran variedad de sensores en el mercado los cuales pueden ser implementados con propósitos específicos, basándose en la información en [22], se puede observar en la tabla 1 los distintos tipos de sensores comúnmente utilizados en agricultura.

Tabla 1. Tipos de sensores utilizados en agricultura. Adaptado de [22].

Sensores Ópticos	Utilizan fenómenos de reflexión de luz para variables como sustancias orgánicas del suelo, humedad, minerales, color, etc.
Sensores Electroquímicos o Electromagnéticos	Características como niveles de nutrientes, pH, nitratos residuales y materia orgánica.
Sensores Mecánicos	Ingresan al suelo y registran la fuerza para estimar la presión
Sensores de flujo de aire	Permiten medir la permeabilidad al aire y el porcentaje de humedad, también diferenciar tipos de suelo
Matriz de puertas lógicas FPGA	Son flexibles y reconfigurables, sin embargo, son principalmente usados para medir la transpiración, el riego y la humedad
Sensores Optoelectrónicos	Son de utilidad para diferenciar el tipo de plantación: Malezas, herbicidas, y plantas no deseadas
Sensores Ultrasónicos	Utilizados comúnmente para monitoreos de tanques, distancia de rociados, control de alturas y ancho de barras.
Sensores de nivel de agua blanda SWLB	Utilizados en cuencas agrícolas para caracterizar los comportamientos hidrológicos tales como nivel y caudal de agua
Sensores basados en Covarianza de Eddy	Permiten cuantificar los intercambios de dióxido de carbono, vapor de agua, metano y otros gases entre la superficie y la atmósfera

2.2.3.2. Capa de red

La capa de red incluye las redes de datos que permiten la comunicación entre los diferentes dispositivos de un sistema IoT, en esta se especifican los diferentes protocolos y medios de red requeridos para tal fin. Los autores en [23] plantean que la tecnología de comunicación juega un papel fundamental en el desarrollo exitoso de los proyectos IoT en el agro, es por esto que su selección adecuada es de vital importancia y para ello es necesario tener en cuenta que puede ser clasificada en comunicación estándar, que como su nombre lo indica, hace uso de acuerdos para el intercambio de información los cuales a su vez, son clasificados en estándares de corto alcance como pueden ser: Bluetooth, Zigbee, Z-Wave y la identificación por radiofrecuencia RFID (por sus siglas en inglés), estos trabajan en un alcance de aproximadamente 100 metros de distancia. Por otra parte, existen estándares de largo alcance o de área amplia de baja potencia LPWA (por sus siglas en inglés) tales como LoRa, Sigfox y Banda estrecha del internet de las cosas NB-IoT (por sus siglas en inglés) los cuales son capaces de trabajar en un rango de varios kilómetros. Así mismo, esta tecnología se clasifica en el espectro de comunicación la cual a su vez se divide entre el espectro licenciado y el no licenciado, donde el primero de estos se refiere a la banda de frecuencia en la cual es posible transmitir los datos de manera segura y con poca interferencia, con una infraestructura de costo medio al usuario pero alto en la suscripción ya que se debe pagar a quien tiene asignado dado espectro en frecuencia para poder transmitir, mientras que el espectro no licenciado es más inseguro en la transmisión de los datos y ya que cualquier persona puede usar sus bandas de frecuencia tienen una mayor interferencia. Sin embargo, estos presentan un costo mucho menor en la suscripción y uno ligeramente más alto en la infraestructura que debe implementar el usuario. Por último, se puede realizar una clasificación según el escenario de aplicación donde los dispositivos IoT pueden ser usados como nodos, transmitiendo a una baja tasa de transferencia de datos en una corta distancia, así como también pueden ser usados como redes de retorno, las cuales tienen una tasa de transferencia alta de datos en largas distancia, por lo que la elección del tipo de comunicación para un sistema IoT debe ser

seleccionada con cuidado y con base a algunos criterios como los anteriormente presentados, además de tener en cuenta aspectos como la topología de red, donde pueden presentarse de tipo igual-a-igual P2P (por sus siglas en inglés) o línea, malla, estrella, anillo, árbol, etc. Así como también tener en cuenta, las funciones que realizará el dispositivo ya que pueden ser dispositivo de función completa FFD (por sus siglas en inglés), dispositivo de función reducida RFD (por sus siglas en inglés) o red de área personal PAN (por sus siglas en inglés), entre otras.

Por otra parte, en [24] el artículo presenta la necesidad de utilizar tecnologías económicas y de bajo consumo energético como Zigbee, ya que permite la interconexión de los nodos creando así la red de sensores inalámbricos WSN (por sus siglas en inglés). Sin embargo, esta tecnología se restringe a un rango de transmisión entre 50m - 100m, mientras que la tecnología de comunicación LoRa tiene un rango de transmisión máximo cercano a los 30 Km con un consumo bajo en relación a la distancia de alcance, pero sacrificando velocidad de transmisión dado que presenta una tasa entre 0.3 a 50 kb/s. Por lo que la tecnología de comunicación Zigbee al parecer presenta mejores ventajas para la aplicación propuesta, ya que además los autores en [25] plantean que presenta un bajo consumo de energía permitiendo transmisión de datos a mayor distancia según la referencia del módulo escogido para el envío de datos, aunque a una baja tasa de transferencia como se muestra en la figura 5, ademárs de presentar una comparación en términos de tasa de datos y distancia de transmisión, clasifica las tecnologías licenciadas y no licenciadas.

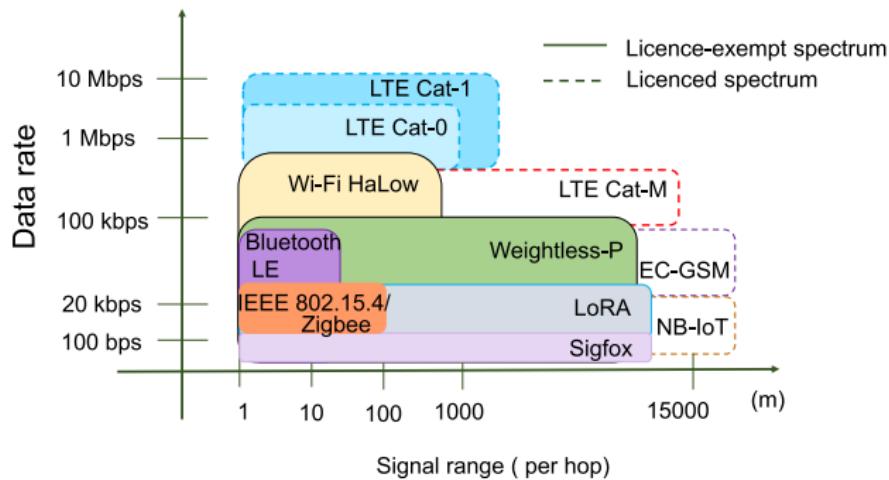


Figura 5. Clasificación de tecnologías de comunicación por tasa de datos y distancia de transmisión. Tomado de [25].

- **Tecnologías de comunicación**

La conectividad inalámbrica en la implementación de sistemas IoT aplicados en la agricultura es fundamental en la conexión de las redes de sensores inalámbricos WSN (por sus siglas en inglés) con internet, evidenciado de forma precisa en el marco teórico. Según [26] para su elección se deben considerar parámetros como: el rango de distancia de comunicación, la velocidad de transmisión, la duración de la batería, la latencia, entre otros. Por lo que los autores plantean los beneficios de establecer las redes de comunicación de los sistemas en agricultura, por medio de tecnologías de tipo LPWAN como LoRaWAN y NB-IoT ya que estas permiten tener un largo alcance de comunicación, requiriendo baja potencia o consumo. Sin embargo, en [27] se presenta la comparación de algunas tecnologías de comunicación, algunas se muestran en la tabla 2 donde se observa que, si el factor

crítico es el consumo del sistema, las redes Bluetooth y Zigbee son las más recomendadas, mientras que si el factor crítico es la distancia de comunicación es mejor optar por otras como LoRa y NB-IoT.

Tabla 2. Comparación de tecnologías de comunicación en agricultura. Adaptada de [27].

Parámetros	Bluetooth	ZigBee	WiFi	lora	NB - IOT
Estándar	IEEE802.15.1	IEEE802.15.4	IEEE802.11	IEEE802.15.4.4	3GPP versión 13
frecuencia	2,4 GHz (sin licencia)	866/915 MHz y 2,4 GHz (Sin licencia)	2,4 GHz (Sin licencia)	869/915 MHz (sin licencia)	Frecuencia LTE (con licencia)
Modulación	GMSK	BPSK/OQPS K	BPSK/OQPS K	GFSK	SC-FDMA (UL) OFDMA (DL)
Velocidad de datos	1Mbps	20,40 y 250 kbps	11 - 54 y 150 Mbps	50kbps	160-200 kbps (UL) 160-250 kbps (DL)
Consumo de energía (Tx)	10 mw	36,9 mw	835mw	100 mw	106 mw
Distancia	interior:20m exterior:100 m	100m	100 m	Urbano: 2-5 km Urbano: 1-8 km	Urbano: 1-8 km suburbano: 25 km

De igual manera, al considerar los requerimientos que se tienen en los entornos rurales en que se encuentran los cultivos agrícolas, se implementaron tres tipos de arquitectura de WSN basados en LoRa, NB-IoT y Zigbee como las que se muestran en la Tabla 2, donde es posible observar los distintos elementos a considerar al implementar una red u otra, ya que por ejemplo en la red LoRa es imprescindible el uso de un emisor y receptor de este tipo para el envío y recepción de los datos, así como para la arquitectura NB-IoT es necesario el uso de un bus de comunicación que para este caso es un RS485 que permite la transmisión de datos de los sensores a la red de tipo NB-IoT y de allí a internet, mientras que para la red de tipo Zigbee es necesario el uso de módulos que soporten este protocolo de comunicación y su configuración como enrutador y coordinador de la red.

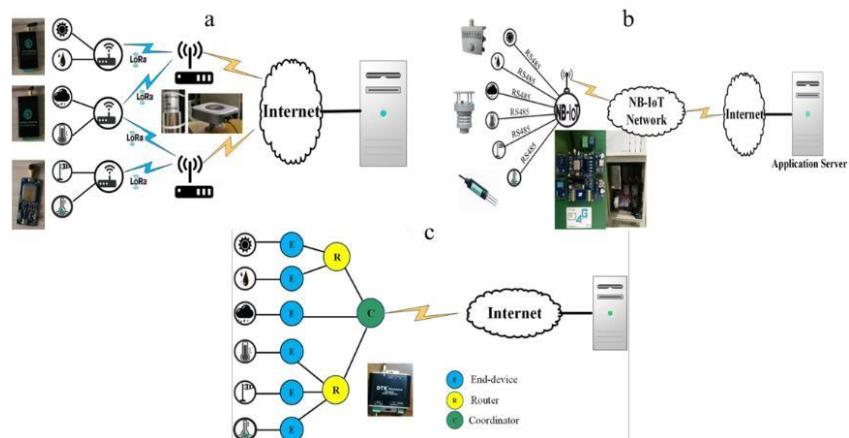


Figura 6. a) Arquitectura WSN LoRa, b) Arquitectura WSN NB-IoT, c) Arquitectura WSN Zigbee.
Tomado de [27].

Teniendo en cuenta las arquitecturas anteriormente presentadas en la figura 6, es importante resaltar que en la prueba de consumo se realizó el envío de datos a diferentes distancias, teniendo una ubicación de los componentes de cada una como se muestra en la figura 7, donde se observa que la red de comunicación de tipo Zigbee soporta un mayor alcance al mostrado en la tabla 2 al posicionar enrutadores de manera equidistante cada 100 m aproximadamente, siendo además este parámetro dependiente del módulo que se esté usando ya que para este caso es un CC2630 de TI Company con placa de desarrollo Semtech SX1278.

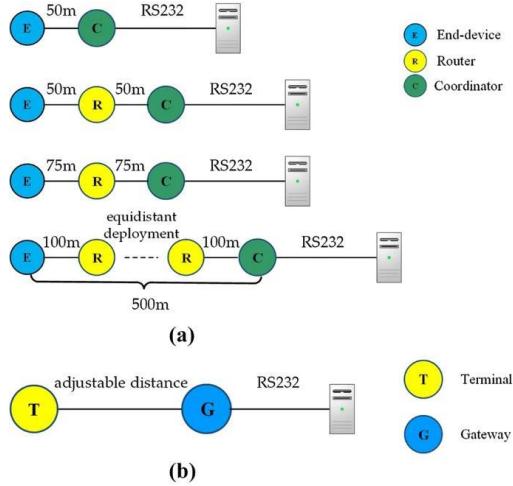


Figura 7. a) Esquema de red Zigbee, b) Esquema de red LoRa y NB-IoT. Tomado [27].

A diferencia de algunos métodos más tradicionales, en [27] se evalúa el consumo de la redes anteriormente expuestas enviando datos a un servidor web a diferentes distancias, con el objetivo de medir el tiempo normal de comunicación, el cual es tomado desde que el servidor empieza a recibir continuamente los datos, hasta que deja de recibirllos por agotamiento de las baterías de cada WSN, por lo que ante una mayor duración en el tiempo normal de comunicación se tiene un menor consumo de energía y por tanto mayor duración de la batería, con lo cual en la figura 7 se puede observar que la WSN de tipo Zigbee tiene el menor consumo de energía, siendo casi una tercera parte en comparación a las de tipo LoRa y NB-IoT.

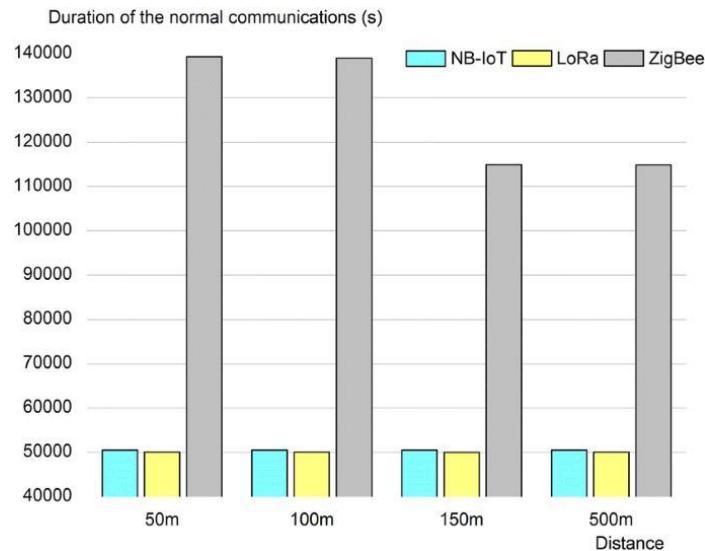


Figura 8. Tiempo de comunicación normal de las WSN. Tomado de [27]

De esta manera, se puede concluir que la elección de las tecnologías de comunicación para sistemas IoT en agricultura depende especialmente de los requerimientos de distancia de comunicación y consumo máximo de energía que se pueda tener, ya que de manera general en este tipo de aplicaciones no se requiere de una alta velocidad de transmisión en los datos. Además, se debe tener en cuenta el tipo de cultivo en el que se implementará el sistema tal y como lo sugieren los autores en [27], donde se plantea que para grandes extensiones de terreno es mejor el uso de tecnología de comunicación tipo LPWAN (LoRa/NB-IoT) ya que aunque consume más energía permite el intercambio de datos a grandes distancias de manera más sencilla que con la red tipo Zigbee, la cual presenta una mayor conveniencia si la extensión del terreno no es muy grande (como es el caso del cultivo en el que se implementará el presente proyecto de grado) y puede ser cubierta sin la necesidad de muchos enrutadores de interconexión ya que su consumo de energía es mucho menor.

- Redes de sensores inalámbricos WSN

Un ejemplo bastante claro de las capas de percepción y red se presenta en [28], ya que plantea que una red de sensores inalámbricos WSN (por sus siglas en inglés) consiste en sensores distribuidos espacialmente y uno o más nodos receptores o también llamados estaciones base. Cada uno de los nodos de la red puede incluir sensores de tiempo real de cualquier tipo, donde para esta investigación los sensores de interés se enfocan en variables ambientales de los cultivos, que pueden actuar como originador o enrutador, y la estación base recopila datos de todos los sensores. Como se puede observar en la figura 9, se presenta una red WSN orientada al monitoreo de la ocurrencia de alguna variable, donde el nodo señalado en rojo tiene la información solicitada, que es requerida por la estación base, la cual se comunica con el usuario final vía conexiones directas, satélite, internet o cualquier tipo de comunicación inalámbrica.

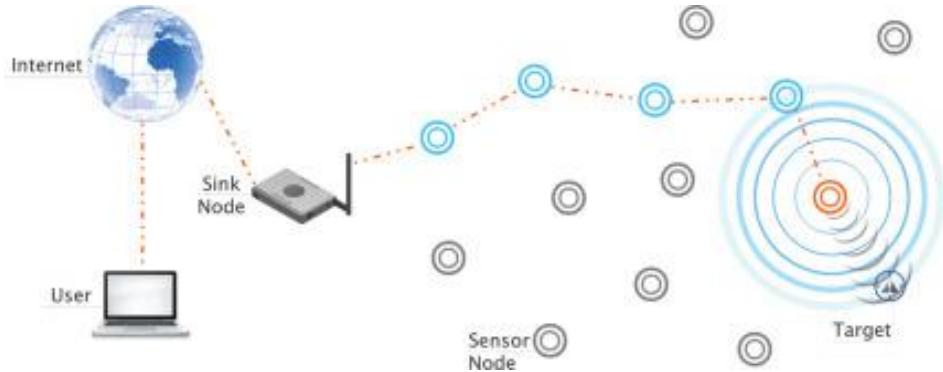


Figura 9. Ejemplo de una red WSN. Tomado de [28].

En el esquema de la figura 9 también se resalta que pueden existir más de una sola base y más de un usuario final. Además, se pueden dividir en diferentes tipos dependiendo de los sensores o la ubicación de estos como redes de sensores multimedia, sensores acuáticos, subterráneos, corporales, redes de sensores y actuadores, entre otros. Una de las ventajas de las redes WSN es que funcionan para ecosistemas hostiles, donde los escenarios de medida son riesgosos o ineficientes [29]. Sin embargo, se limitan a la conexión entre cada uno de los nodos y dependiendo de su implementación si es de manera determinística, la cual consiste en generar una topología de red que se ajuste a los requerimientos del usuario o de manera aleatoria, la cual se emplea con frecuencia en entornos difíciles o remotos, se puede perder la conexión de alguno de los nodos. Por lo que según

[30] una de las futuras oportunidades de investigación es solucionar este problema con una red combinada que permita integrar diferentes estándares como GSM, UMTS, LTE, 5G, entre otros.

2.2.3.3. Capa de aplicación

La capa de aplicación en conformidad con [31] se compone de la interacción hombre máquina es decir el sistema interactúa directamente con los datos del usuario final donde se encuentra entrada y salida de estos, algunos ejemplos de lo que incluye la capa de aplicación son los navegadores web y clientes de correo electrónico, y provee conexión del usuario a las capas inferiores, esto incluye aplicaciones, servicios, interfaces, entre otros. Se puede relacionar esta capa como la materialización de la solución orientada a la experiencia del usuario dado que se debe adaptar a cada tipo de persona para la cual fue diseñado el sistema y el contexto en el que se utilizará, puede ser, para casas, ciudades, o para el caso de esta investigación, para cultivos de hortalizas.

Según el análisis realizado por [32] hay diferentes formas de aplicaciones utilizadas en sistemas IoT orientados a la agricultura, usadas en diferentes áreas como inventarios, maquinaria, riego, administración del agua, monitoreo climático, automatización, entre otras. Hay diferentes factores que pueden ser monitoreados y estos dependen del sector de la agricultura en el que se consideren, para el caso de esta investigación la aplicación se enfocaría en cultivos, por lo que el artículo recomienda diferentes parámetros a considerar por la aplicación, dado que en el crecimiento de plantaciones hay variables ambientales que afectan, las cuales incluyen, lluvias, humedad del suelo, pestes, humedad de las hojas, temperatura, salinidad, entre otras. Al obtener esta información, se puede optimizar la toma de decisiones para mejorar la calidad de los cultivos, minimizar el riesgo y las pérdidas, aumentando las ganancias. También se hace importante la analítica de datos ya que puede realizar predicciones útiles para el cultivo, administrar la información de manera adecuada y facilitar el trabajo de los agricultores.

Por último, una vez seleccionada la tecnología para transmitir los datos, las aplicaciones IoT generalmente están acompañadas de plataformas que brindan servicios orientados a la capa de aplicación. Según los autores en [33] algunas ventajas que ofrecen estas plataformas al diseñador consisten en cambios del dispositivo, control, publicación de datos, analítica de datos y adición de nuevos dispositivos, entre otras. Gracias a estas se procesa la información, por cualquiera de los métodos de análisis mencionados y luego se muestra al usuario a través de la interfaz gráfica, así como las predicciones, alertas o recomendaciones que el sistema debe generar.

2.2.4. Protección IP

El estándar internacional de protección (IEC 60529) o también conocido como clasificación de protección de ingreso IP (por sus siglas en inglés), se utiliza para determinar el grado de efectividad en el sellado de dispositivos eléctricos contra la intrusión de agua o polvo. Este código siempre se compone por el indicativo IP, seguido de dos dígitos que clasifican la protección en el equipo. En la segunda edición de la norma se proporciona una ampliación opcional al código IP mediante una letra adicional A, B, C o D, esto con el objetivo de denotar información adicional relacionada con la protección del dispositivo. El primer dígito seguido del indicativo IP indica el nivel de protección con el que cuenta el dispositivo cerrado contra la entrada de polvo, objetos extraños sólidos o contra el acceso de personas a elementos peligrosos, este puede variar en una escala de 0 a 6, siendo el grado 0 un nivel en el cual no existe protección y el grado 6 el nivel en el cual el polvo no entra a este en ninguna circunstancia. El segundo dígito que acompaña al indicativo IP en la clasificación indica el nivel de protección contra el agua, se organiza en una escala que comienza desde el número 0 hasta 8 y finaliza con el indicativo de protección máxima 9K, el grado 0 indica que no existe ninguna protección en contra del agua en el dispositivo, el grado 8 indica que este debe soportar la inmersión

completa y continua en profundidad durante el tiempo que especifica cada fabricante, con lo cual no debería ingresar el agua. Adicionalmente, existe el grado de protección máximo el cual es 9K este especifica que el dispositivo soporta potentes chorros de agua a altas temperaturas durante el tiempo establecido por el fabricante con una temperatura del agua de 80°C a una distancia de entre 0.1-0.15 metros, con una presión de 8000–10000 kPa / 80–100 Bar, con un volumen de agua de 14-16 litros por minuto, donde este nivel de protección IPx9K es definido en el estándar alemán DIN 40050-9 y no en la IEC 60529. En la tabla que se presenta a continuación se puede apreciar información técnica del estándar, ésta fue extraída de la norma IEC 60529 que puede ser consultada en [34], la información explicativa se extrajo con base en esta norma.

Tabla 3. Grados de protección IP. Tomada de [34].

Elemento	Cifras o Letras	Significado para la protección del equipo	Significado para la protección de personas
Letras del código	IP	—	—
Primera cifra característica	0 1 2 3 4 5 6	Contra el ingreso de objetos sólidos extraños (no protegidos) ≥ 50 mm de diámetro ≥ 12,5 mm de diámetro ≥ 2,5 mm de diámetro ≥ 1,0 mm de diámetro protegido contra el polvo estanco al polvo	Contra el acceso a partes peligrosas con: (no protegido) el dorso de la mano dedo herramienta alambre alambre alambre
Segunda cifra característica	0 1 2 3 4 5 6 7 8	Contra la penetración de agua con efectos perjudiciales (no protegido) protegido contra las caídas verticales de gotas de agua protegido contra las gotas de agua con inclinación máx. de 15° protegido contra el agua en forma de lluvia protegido contra las proyecciones de agua protegido contra los chorros de agua protegido contra los chorros fuertes de agua inmersión temporal inmersión continua	—
Letra Adicional (Opcional)	A B C D	—	Contra el acceso a partes peligrosas con: dorso de mano dedo herramienta alambre
Letra Suplementaria (Opcional)	H M S W	Información Suplementaria específica de: Material a alta tensión Movimiento durante el ensayo de agua Inmóvil durante el ensayo de agua Intemperie	—

3. Propuesta y desarrollo de la solución

3.1. Descripción general

Se propone un sistema electrónico capaz de medir la temperatura y humedad tanto ambiental como de suelo, por medio de un nodo inalámbrico compuesto por sensores los cuales se controlan mediante una tarjeta de procesamiento que se conecta con un módulo de comunicación encargado de enviar los datos a una estación base, que a su vez recibe la información. La principal función de la estación base es reenviar los datos en primer lugar a un sistema local, en donde se tiene una interfaz gráfica de usuario compuesta por una pantalla HMI en donde los usuarios pueden estimar el estado de su cultivo en tiempo real, además de controlar los actuadores y/o alarmas que son activadas de manera automática cuando el sistema detecta mediciones anormales en la temperatura o humedad del cultivo. De igual manera, el módulo coordinador de la red se encarga de enviar los datos a una placa de desarrollo que permite transmitir los datos a un servidor web, donde por medio de la configuración y programación de la plataforma se puede generar una analítica de datos robusta, la cual se presenta en una página web que contiene una segunda interfaz gráfica de usuario, que permite a las personas evaluar de manera más detallada el comportamiento de su cultivo a lo largo del tiempo y visualizar la sugerencia de riego recomendada para mantener un estado óptimo en la plantación.

Por último, es importante resaltar que el dispositivo cuenta con protección contra agua y polvo en los elementos ubicados a la intemperie, debido a las condiciones generales que se tienen en los entornos rurales, así como también una autonomía mínima de la batería de 168 horas en el nodo inalámbrico.0.

3.2. Diagrama de bloques

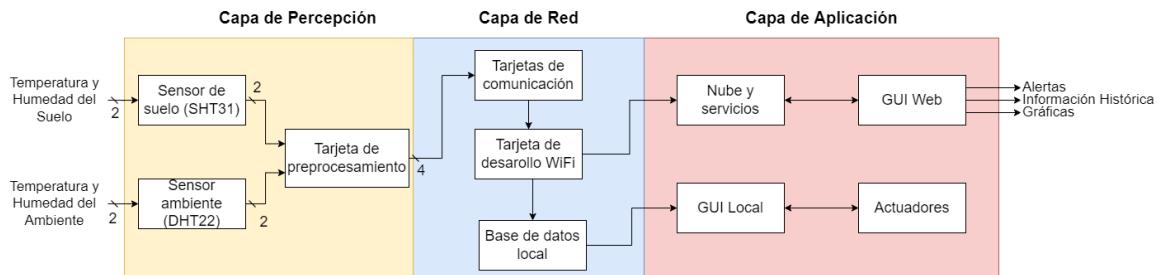


Figura 10. Diagrama de bloques del sistema.

En el diagrama de bloques del sistema propuesto en la figura 10, se observan los bloques de los sensores de temperatura y humedad encargados de medir las variables ambientales y de suelo, siendo esta la capa de percepción descrita con anterioridad. Las señales de salida de los sensores son adquiridas por el bloque de tarjeta de preprocesamiento donde se ajustan los datos recibidos para ser luego enviados por medio de un protocolo de comunicación inalámbrico, además en este bloque se tiene una serie de circuitos de adecuación para asegurar la lectura de la información y la estabilidad eléctrica del sistema. Seguidamente se encuentran las tarjetas de comunicación que permiten el transporte de los datos entre el nodo inalámbrico y la estación coordinadora, en la cual se encuentra el bloque de tarjeta de desarrollo, donde se realiza la transmisión por medio de un protocolo de comunicación adecuado a una puerta de enlace que realiza el reenvío de datos a la nube, en el servidor web de elección se realiza la analítica de datos en la cual se procesa la información relevante del cultivo, que se enlaza a una interfaz web en donde se presentan las gráficas y datos de manera intuitiva a los usuarios, quienes además de visualizar esta información tienen acceso a los análisis de los comportamientos de las variables ambientales, para tomar acciones preventivas o correctivas en caso

de ser necesario. Así mismo, el bloque de tarjeta de desarrollo no solo realiza el envío a la nube, sino que también a una base de datos local, en ella se almacenan los datos que serán presentados en una interfaz gráfica de usuario local, que muestra información más básica que la interfaz web. Sin embargo, en esta también se puede realizar el control de las alarmas y visualización de datos en tiempo real, en caso de no tener una conexión a internet o un dispositivo compatible. Las salidas del sistema consisten en alertas, información histórica del estado del cultivo y graficas para observar su comportamiento a través del tiempo.

3.3. Diseño electrónico

3.3.1. Sensores de variables críticas

En esta sección se presenta la comparativa de diferentes sensores para la medición de temperatura y humedad en el ambiente y suelo, especialmente importantes para los cultivos. Se especifican sus características, su desempeño y se resaltan las ventajas de cada uno con el objetivo de identificar los sensores que se usarán para el diseño del sistema.

3.3.2. Selección de los sensores

3.3.2.1. Sensores de ambiente DHT

Para realizar la selección del sensor de temperatura y humedad del ambiente, se realizó una tabla comparativa en la cual se plasmaron diferentes alternativas, en ella se presentan las características más relevantes para elegir adecuadamente el sensor, tales como el consumo de corriente, rango de operación, precisión, resolución y protocolo de comunicación. Con base en estos parámetros se eligió el DHT22 que como se puede ver en [35], cuenta con un rango de medición de temperatura por debajo de los 0°C a diferencia del DHT11 que no puede hacerlo, lo cual resulta apropiado ya que en un cultivo se esperan temperaturas menores a 0°C. Así mismo, el rango de medición de humedad es mejor para estimar el estado de los cultivos y la precisión tanto de temperatura como de humedad es más conveniente. Por otra parte, el DHT21 cuenta con el mismo rango de medición de temperatura que el DHT22, con una resolución mayor a la que puede ofrecer este último, pero un costo muy elevado en el mercado y es por esto que el DHT22 es la mejor opción, ya que es utilizado en aplicaciones de control automático de temperatura, aire acondicionado, monitoreo ambiental en agricultura y demás campos relacionados.

Tabla 4. Comparativa sensores temperatura y humedad ambiente.

Sensor ambiente	Alimentación		Rango		Temperatura		Humedad	
	V	mA	Temperatura (°C)	Humedad (%RH)	Precisión (°C)	Resolución (°C)	Precisión (% RH)	Resolución (% RH)
DHT11	3 a 5	2.5	0 a 50	20 a 90	±2.0	0.1	± 5	1.0
DHT22	3 a 6	2.5	-40 a 80	0 a 100	±0.5	0.1	± 2	2.0
DHT21	3.5 a 5.5	1.5	-40 a 80	0 a 100	±0.5	0.1	± 3	0.1

3.3.2.2. Sensores de suelo SHT

De la misma forma, para realizar la selección del sensor de temperatura y humedad del suelo se compararon las alternativas presentadas en la tabla 5, donde se pueden contrastar las características con las que cuenta el sensor SHT31, allí se evidencia que el rango de temperatura que va entre los -10°C hasta 80°C, este es suficiente para las mediciones que se presentan en los cultivos de hortalizas ya que los sensores SHT35, así como el SHT21 cuentan con un rango de temperatura muy grande el cual no resulta necesario para dar solución a la necesidad propuesta, así como su elevado costo y difícil adquisición en el país. Por otra parte, el SHT31 cuenta con una precisión y resolución suficiente

para la aplicación en cuestión, luego de comparar estas alternativas se seleccionó el sensor SHT31 de temperatura y humedad relativa de tipo industrial, el cual proporciona una salida digital. Además, el dispositivo cuenta con un muy bajo consumo de energía en modo de reposo como se puede evidenciar en [36] éste es de aproximadamente de 2 a $5\mu\text{W}$ y en modo activo de 67.2 a 154mW, además la comunicación es serial bidireccional. Este cuenta con un empaquetado robusto, lo que lo hace ideal para aplicaciones que suponen condiciones extremas y trabajo pesado como en la agricultura, ofreciendo un alto desempeño y durabilidad, ya que este sensor cuenta con una membrana que evita el ingreso de suciedad y gotas de agua al dispositivo, además esta ofrece una protección IP54, donde en caso de que se quiera una mayor protección contra agua y polvo es necesario sellar la placa con epoxi para lograr una protección IP67.

Tabla 5. Comparativa sensores temperatura y humedad suelo.

Sensor suelo	Alimentación		Rango		Temperatura		Humedad	
	V	mA	Temperatura (°C)	Humedad (%RH)	Precisión (°C)	Resolución (°C)	Precisión (% RH)	Resolución (% RH)
SHT31	2.4 a 5.5	2.5	-40 a 125	0 a 100	± 0.2	0.015	± 2	0.01
SHT35	2.4 a 5.5	800	-40 a 90	0-100	± 0.2	0.015	± 1.5	0.01
SHT21	2.1 a 3.6	15	-40 a 125	0-100	± 0.3	0.01	± 2.0	0.01

3.3.2.3. Adecuación de las señales

Para la alimentación de los sensores es necesario implementar un circuito de regulación de voltaje como el que se muestra en la figura 11, en esta se relaciona el esquemático para el Pololu 2119 que permite un voltaje de entrada en el rango de 2.7 a 11.8V y genera una salida de 5 V. Por otra parte, para el sensor DHT22 se debe poner una resistencia de *pull-up* de 5,1 kΩ dado que se necesita conducir la señal hacia un valor de voltaje bajo, mientras que para el sensor SHT31 el fabricante recomienda una resistencia de *pull-up* de 10 kΩ, esto se muestra en la figura 12.

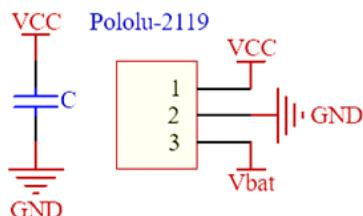


Figura 11. Circuito esquemático del sensor DHT22.

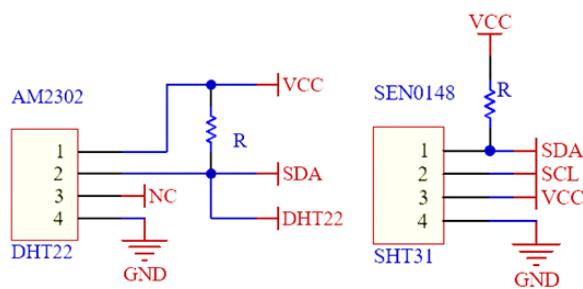


Figura 12. Circuito esquemático del sensor SHT31.

3.3.2.4. Caracterización de los sensores

Para la caracterización de los sensores se usó el sensor HM70 el cual es una referencia óptima en las mediciones de temperatura y humedad tanto ambiental como de la tierra, ya que cuenta con una precisión de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ y $\pm 1\%$ RH respectivamente. Este sensor permite realizar la grabación de las mediciones realizadas en un periodo de tiempo e intervalo configurado, por lo que se realizará durante 18 horas con un tiempo de muestreo de 5 minutos ya que al estar en la temperatura ambiente no se tienen cambios abruptos en las condiciones climáticas. Es por esto por lo que al tener las mediciones de referencia del sensor HM70 almacenadas, son transmitidas a un computador mediante el programa de Vaisala M170 Link Program para realizar gráficas de temperatura y humedad vs tiempo. Además, se puede realizar la lectura de los sensores DHT22 y SHT31 para su respectiva calibración, con lo cual se genera un archivo .csv el cual permite realizar las gráficas de temperatura y humedad de cada sensor en el mismo intervalo y tiempo de muestreo, para luego compararlas con las generadas con el sensor HM70. De esta manera, al tener las gráficas de los datos teóricos del sensor HM70 y las de los datos experimentales de cada sensor, se pueden realizar otras, con la que se lleva a cabo un análisis matemático para determinar qué valor constante agregar para hacer que la experimental sea aproximadamente igual a la teórica.

Una vez realizadas las mediciones con los sensores DHT22 y SHT30 como se describió en el protocolo de medición, se obtuvieron los datos de humedad y temperatura con los cuales se puede comparar el comportamiento frente al instrumento de referencia (HM70) y de este modo realizar el ajuste de los datos obtenidos. De esta manera, contrastando los datos del HM70 frente al DHT22 se calculó el error pronóstico de los datos usando la expresión de la ecuación 1 para ajustar la lectura del sensor DHT22 a la medición del HM70.

$$\text{Error pronóstico} = \frac{\sum_{i=0}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (1)$$

Donde y_i corresponde al dato medido por el HM70, \hat{y}_i corresponde al dato medido por el DHT22 y n es el total de mediciones que como se observa en la figura 13 son 216 debido a que tienen un tiempo por muestra de 5 minutos obteniendo así las 18 horas de medición propuestas en el protocolo de caracterización. Así mismo, es importante resaltar que en las figuras 13, 14, 15 y 16 las funciones en color azul corresponden a las del HM70, las funciones descritas mediante una línea punteada son las de los sensores DHT22 o SHT30 y las de color anaranjado son las correspondientes al ajuste realizado a cada sensor. De esta manera, para el caso de la temperatura del DHT22, se sumó el error pronóstico calculado mediante la ecuación 1 que es de $0,17^{\circ}\text{C}$ obteniendo las funciones mostradas en la figura 13, de igual modo se restó el error pronóstico de los datos de humedad que es de $3,51\%\text{RH}$ dando como resultado las funciones mostradas en la figura 14.

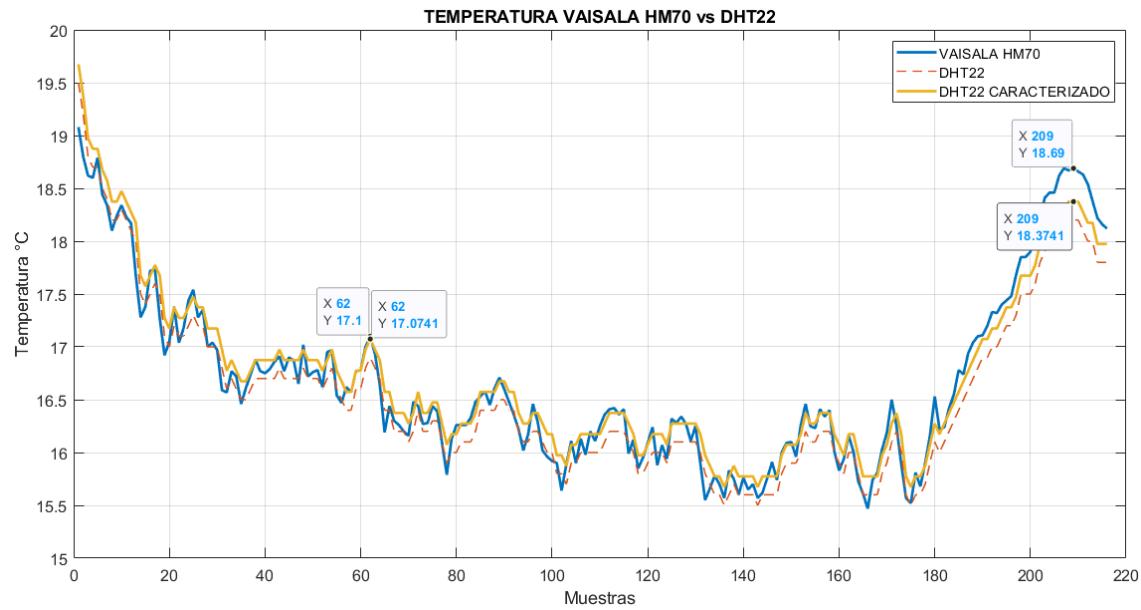


Figura 13. Caracterización Temperatura HM70 vs DHT22.

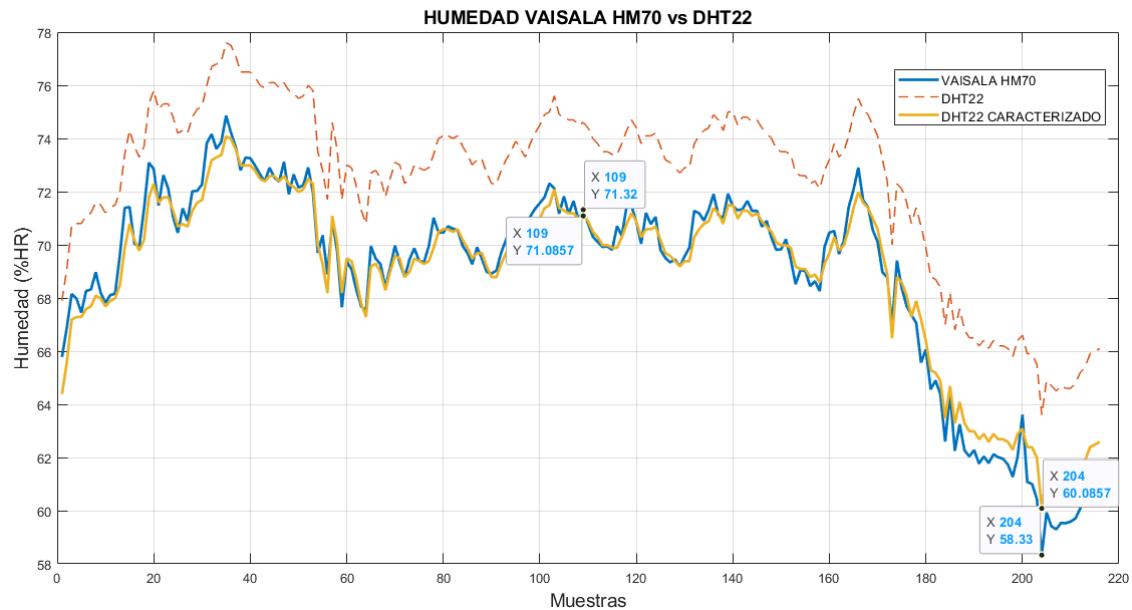


Figura 14. Caracterización Humedad HM70 vs DHT22.

De igual manera, el procedimiento para ajustar el sensor SHT30 fue el mismo que para el caso del DHT22, al usar como instrumento de referencia el (HM70) y el cálculo del error pronostico que para este caso es de 0,1°C para los datos de temperatura y de 3,41%RH para los de humedad relativa, donde para ambos casos fue necesario restar estos valores a los datos del sensor para ajustarlo como se observa en las figuras 15 y 16.

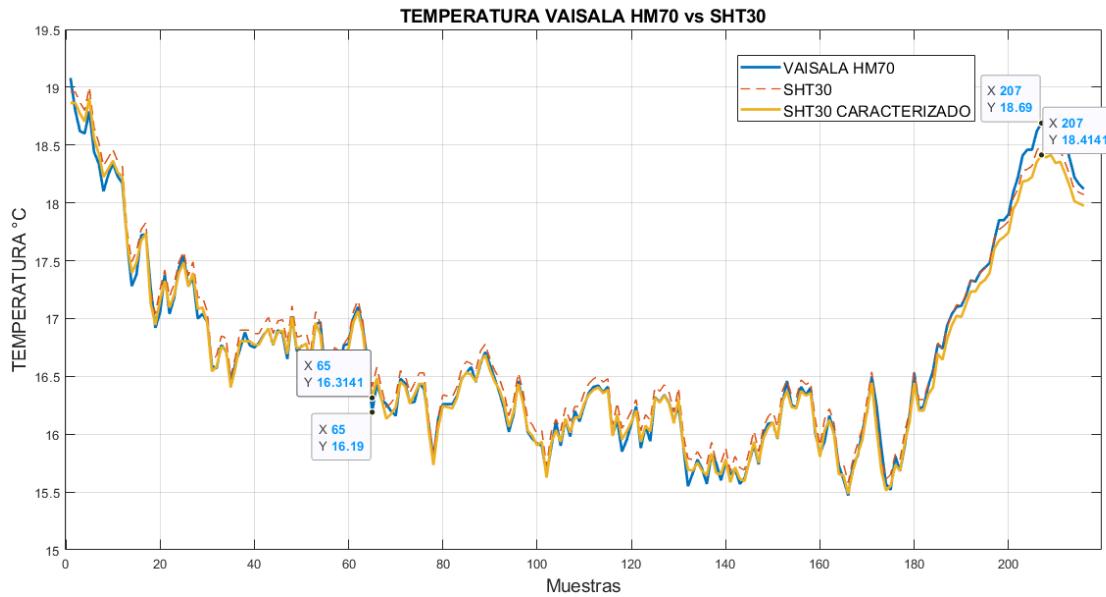


Figura 15. Caracterización Temperatura HM70 vs SHT30.

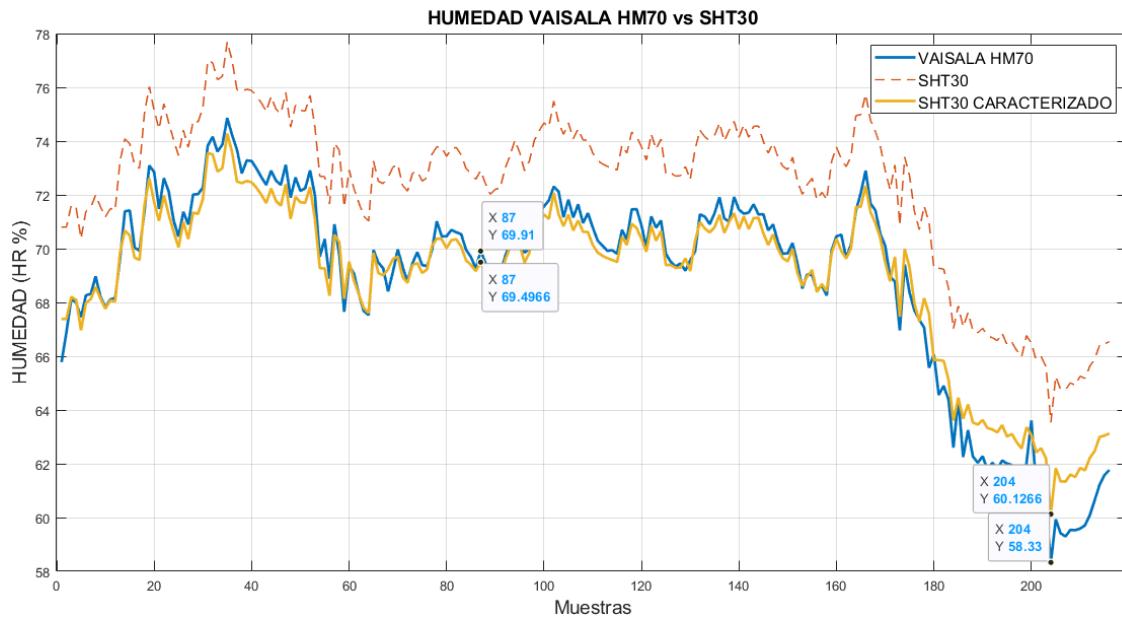


Figura 16. Caracterización Humedad HM70 vs SHT30.

3.3.3. Selección de módulos de comunicación

Al elegir Zigbee como tecnología de comunicación se deben tener en cuenta diversos factores como los protocolos de comunicación comúnmente utilizados en las tarjetas comerciales, rango de transmisión, consumo, entre otros. En la tabla 6 se observa que los módulos Zigbee hacen uso de una comunicación serial para enviar y recibir datos, esta se encarga de transmitir los datos desde un nodo hacia un enrutador o coordinador, posteriormente es necesario un dispositivo que a su vez sea compatible con comunicación serial para recibir los datos transmitidos y allí analizarlos. Teniendo en cuenta lo anterior, las últimas generaciones de tarjetas Zigbee presentan un microcontrolador embebido, que permite añadir protocolos de comunicación como I2C así como pines digitales y

análogos y conversores análogo-digitales permitiendo al módulo procesar la información antes de enviarla, permitiendo que el nodo receptor pueda mostrar los datos mediante algún periférico o incluso realizar análisis sencillos de la información dado que el microcontrolador integrado no es tan potente o compatible como lo pueden ser dispositivos externos.

Tabla 6. Comparación de tarjetas compatibles con la tecnología Zigbee.

Referencia	Fabricante	Consumo (mA)	Rango en Interiores	Rango en Exteriores	Micro controlador Embebido	Banda de operación (Ghz)	Protocolos de Comunicación
IPLINK2264	Helicomm	27	30 m	100 m	No	2.4	UART, SPI
ZB2430	Rabbit (Digi)	140	ND	ND	No	2.4	UART, SPI
Xbee S2	Digi	40	120 m	120 m	No	2.4	UART, SPI
Xbee3	Digi	40	1200 m	1200 m	Si	2.4	UART, SPI, I2C
CC2538	Texas Instrument	6.1	7 dBm	7 dBm	Si	2.4	UART, SPI, I2C

Las tarjetas Xbee del fabricante Digi están diseñadas para diferentes usos desde simples comunicaciones Zigbee hasta aplicaciones de baja latencia y alto rendimiento. Estas tarjetas incluyen otros protocolos en un mismo empaquetado, que permiten ampliar, en caso de ser necesario, la cobertura de la red [37]. Por otro lado, su compatibilidad y modularidad facilita realizar cambios de los módulos según el contexto, dado que la mayoría de los empaquetados de Xbee son intercambiables ya que presentan la misma distribución de pines y mismo tamaño, favoreciendo a su vez el diseño de sistemas modulares. Otra de sus ventajas es que cuenta con una interfaz de host definida por el fabricante lo que facilita la configuración y despliegue de la red, brindando mayor flexibilidad dada la posibilidad de cambiar los protocolos que se desean usar según la compatibilidad de la tarjeta. Teniendo en cuenta las evidentes ventajas de los módulos Digi Xbee, para este proyecto la tarjeta utilizada es la Xbee S3, la cual cuenta con un rango de operación de hasta 1200 m [38] que es suficiente para una mayor cobertura del cultivo y en caso de ser necesario dadas las dimensiones del terreno se puede duplicar de manera sencilla.

3.3.4. Selección de tarjeta de procesamiento

Tabla 7. Comparación de tarjetas de procesamiento recomendadas para aplicaciones IoT en agricultura.

Referencia	Frecuencia de operación (MHz)	Consumo	Cantidad de pines	Voltaje de Operación (V)	Protocolos soportados
Atmega328p	16	26 uA	28	1.8 - 5.5	UART, SPI, I2C
ESP32	240	240 mA	48	2.2 - 3.6	UART, SPI, I2C, I2S
PIC16F1827	32	75 uA	14	1.8 - 5.5	UART, SPI, I2C
Xbee3 SoC	50.33	40 mA	15	2.1 - 3.6	UART, SPI, I2C

Teniendo en cuenta la tecnología de comunicación elegida (ZigBee) y que el procesador presente en la tarjeta Xbee S3 no es lo suficientemente potente para realizar la adecuación de las señales medidas mediante los sensores se hace necesario el uso de una tarjeta de preprocesamiento. Según la tabla 7, se observa que el procesador Atmega328p cuenta con 28 pines de los cuales 14 son de entrada/salidas digitales que pueden utilizarse como PWM, 6 entradas analógicas, entre otras características que lo convierten en una opción de bajo costo con alta compatibilidad principalmente con los sensores de variables ambientales a utilizar, además de su versatilidad para su programación, presenta el menor consumo respecto a las otras alternativas, lo que también se vuelve un factor a

considerar para el nodo de medición, dado que este estará alimentado de baterías y se busca la mayor duración posible.

3.3.5. Selección de tarjeta de desarrollo

En el nodo central se realiza además de la adecuación de las tramas recibidas por medio de la tarjeta XBee, la adecuación de los datos para ser enviados a la nube, lo cual incluye la adición de una estampa de tiempo a los datos recibidos, por esta razón la tarjeta de desarrollo ESP32 cobra mayor relevancia dada la integración de WiFi que posee, lo que facilita la conexión a la red existente en la finca sin necesidad de módulos adicionales, que serían necesarios para cualquier otra de las tarjetas de la tabla 7. Por otro lado, esta tarjeta de desarrollo debe ser capaz de enviar a su vez la información a la base de datos local, y mostrarlos en la interfaz local que será independiente a la conexión a internet, lo que involucra el despliegue de los datos en una pantalla. La tarjeta ESP32 tiene un procesador con una alta frecuencia de operación, lo que permite realizar todas las tareas necesarias sin que el procesador se quede sin recursos, y se puede programar directamente en él los parámetros, para la conexión a internet y los parámetros del servidor al cual será enviada la información.

3.3.6. Selección de plataforma IOT

La transmisión de los datos a internet es un componente fundamental de la solución ya que, sin este, el sistema no podría ser considerado como una solución IoT. En este sentido, es primordial seleccionar la plataforma en la nube a la que se enviarán los datos, debido a que según la elección que se realice variarán los algoritmos que deben ser implementados en el módulo WiFi ESP32 para establecer la comunicación. Es por esto que en la tabla 8 adaptada de los autores en [33] muestra algunas características importantes de las plataformas que se utilizan usualmente en sistemas IoT, con lo cual es posible observar que la mayoría presentan un costo por el uso debido a que el tipo de servicio en la nube que ofrecen es privado, lo que no es necesario para este caso en particular. Así mismo, hay tres plataformas que su uso no impactan los costos del proyecto, las cuales además tienen la ventaja de ofrecer la visualización de los datos mediante el sistema de cómputo numérico Matlab que es muy robusto y versátil en la cantidad de algoritmos que permite realizar. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió trabajar con la plataforma de ThingSpeak en la que se cuenta con todas las características requeridas, además de presentar una gran compatibilidad con el módulo ESP32 que presenta algunas librerías para establecer la comunicación a los canales de manera sencilla.

Tabla 8. Comparación de plataformas IoT. Adaptada de [33].

Nombre de la plataforma	Captura en tiempo real de los datos	Visualización de datos	Tipo de servicio de nube	Analítica de datos	Costo para el desarrollador
Ubodots	Si	Si	Público	Si	Gratis
ThingSpeak	Si	Si (Matlab)	Público	Si	Gratis
ThingWorx	Si	Si	Privado (IaaS)	Si	Pago por uso
Xively	Si	Si	Público (IoTaaS)	No	Gratis
Plotly	Si	Si (Matlab)	Público	Si	Gratis
Nimbits	Si	Si (Matlab)	Híbrido	Si	Gratis
Connecterra	Si	Si	Privado (IaaS)	Si	Pago por uso
Axeda	Si	Si	Privado (IaaS)	Si	Pago por uso
Phytech	Si	Si	Privado (IaaS)	Si	Pago por uso
Aekessa	Si	Si	Privado	Si	Pago por uso
Yaler	Si	Si	Privado	Si	Pago por uso

3.3.7. Selección de la pantalla

Para la interfaz gráfica se hizo necesaria la elección de un sistema de visualización que fuera agradable y de fácil manejo por parte de los usuarios, a su vez que su costo fuera equilibrado y permitiera la interacción del usuario con el sistema, las pantallas de interfaz humano-máquina HMI se refieren a cualquier tipo de panel o pantalla que le permite a un usuario interactuar y comunicarse con un sistema [39], este término es ampliamente usado en entornos industriales dado que estas pantallas son frecuentemente usadas en aplicaciones de control, sin embargo, su versatilidad al momento de programar en comparación a otro tipo de pantallas o paneles la hacen la mejor opción para proyectos IoT en la actualidad. En la tabla 9 se observa la comparación de distintos modelos de este tipo de pantallas.

Tabla 9. Comparación de pantallas HMI.

Referencia	Fabricante	Tamaño (in)	Voltaje (V)	Tipo	Memoria interna	Resolucion (px)	Comunicación	Programador	Precio (USD)
NX3224T024_011	Nextion	2.4	4.75 - 7	Touch resistivo	4 MB	320 x 240	UART	Si	20.62
P32240J28C_T01	Proculus	2.8	5	Touch resistivo	32 MB	320 x 240	UART	No	42.33
GEN4-ULCD-24PT	4D Systems	2.4	4 - 5.5	Touch resistivo	14 KB	320 x 240	UART	Si	34.95

La pantalla seleccionada fue la de marca Nextion debido a la ventaja que ofrece al poseer su propio software de diseño, lo que facilita crear una interfaz gráfica amigable para el usuario sin involucrar capacidad de procesamiento del microcontrolador que se encarga de administrar las demás capacidades del sistema, para el caso de la pantalla de la marca Proculus, hace uso de un software externo de pago para realizar la programación y la pantalla de la marca 4D Systems solo posee 14 kb de memoria interna lo que limita la visualización de imágenes o la creación de una interfaz con varias páginas, además la relación costo beneficio hace de la pantalla Nextion la mejor opción para este caso en particular.

3.3.8. Consumo del sistema

En las tablas 10 y 11 se analiza el consumo de corriente en los modos activo y de bajo consumo (para los componentes en los que aplica) de los dos dispositivos, el nodo inalámbrico donde se encuentran los sensores y el coordinador que recibe los datos y envía a internet.

Tabla 10. Consumo del nodo inalámbrico.

Consumo nodo inalámbrico			
Componente	Cantidad	Consumo en modo Activo (mA)	Consumo en modo Sleep (mA)
AMS1117 - 3.3 V	1	5	5
Pololu S7V7F5	1	0.1	0.1
SHT31	1	1.5	0.0006
DHT22	1	2.5	0.05
Atmega328p	1	9	1.7
Oscilador de 16MHz	1	7	7
Resistencia 1k	2	10	10
Xbee 3	1	40	0.002

Total	75.1 mA	23.9 mA
Promedio	49.5 mA	

Tabla 11. Consumo del dispositivo coordinador.

Consumo nodo coordinador			
Componente	Cantidad	Consumo en modo activo (mA)	Consumo en modo sleep (mA)
Pantalla Nextion NX3224T024_011	1	90	15
ESP32 DEVKIT V1	1	190	0.8
Tiny RTC	1	1.5	0.2
Buzzer	1	30	0
Xbee S3	1	17	0.002
Total		352 mA	16 mA
Promedio			184 mA

3.3.9. Selección de la batería

Teniendo en cuenta el consumo teórico relacionado en la tabla 12 se calculó la duración estimada de las baterías obteniendo que para cumplir con la duración estipulada de 201.23 horas en modo Sleep y 63.91 horas en modo activo son necesarias 4 unidades con capacidad de 4.8 Amperios Hora en total, por lo que se eligieron las baterías marca Beston de 1200 mAH de capacidad, al ser recargables le brindan la facilidad al agricultor de solo retirar las baterías y cargarlas en lugar de comprar pilas alcalinas desechables convencionales. Esta referencia de baterías está fabricada con la tecnología de Níquel-Metalhidruro (NiMh) que viene mejorándose desde el año 1990 tiene ventajas respecto a las de tipo Níquel-Cadmio (NiCd) y de Litio, especialmente para esta aplicación. Entre sus ventajas se encuentran: Su precio, dado que la tecnología de litio sigue siendo costosa dado que aún está en desarrollo, su resistencia a temperaturas extremas, su compatibilidad pues según los tamaños estándar en que estas se comercializan, así como la posibilidad de usar diferentes cargadores, uno de sus contras es que tienen menor vida útil, sin embargo, los precios son considerablemente menores a una batería de litio. [40]

Tabla 12. Proyección de la duración de la batería seleccionada.

Consumo del nodo inalámbrico						
T.Activo/ hora (s)	T.Sleep/ hora (s)	Cantidad baterías	Capacidad baterías(A)	Duración sleep(h)	Duración activa(h)	Duración equivalente
30	3570	4	4.80	201.23	63.91	199.02

3.3.10. Diseño de circuitos esquemáticos

3.3.10.1. Nodo inalámbrico

Se diseño el circuito esquemático que integra los dispositivos de medición, polarización y procesamiento de datos para envío, el cual se puede observar en la figura 17 donde en principio, esta cuenta un regulador de voltaje Step-Up/Step-Down que permite tener a la salida un voltaje constante

de 5 V con un rango de entrada de 2.7 V a 11.8 V. Así mismo, se puede observar la conexión del regulador de voltaje de 3.3 V para la polarización de los componentes, dentro de los cuales se incluyen los sensores seleccionados anteriormente y que ya presentan las adecuaciones mostradas en secciones anteriores. Además, el microcontrolador Atmega328P está conectado a un oscilador externo de 16 MHz, así como a un pulsador que permite reiniciarlo manualmente, por último, a este se conectan los sensores para que por medio de este sean leídas las mediciones, a su vez la tarjeta se conecta con el módulo Xbee el cual se encarga de transmitir los datos de manera inalámbrica al nodo central del sistema. Finalmente se diseñó el circuito impreso o PCB que se muestra en la figura 18 en donde se posicionaron los componentes de una manera adecuada para poder crear las rutas de conexión eficientemente. Así mismo, se realizó un plano de tierra en la capa de *Top Overlay* de la tarjeta, esto con el objetivo de reducir las interferencias externas y ruido que pueden intensificarse en determinados entornos.

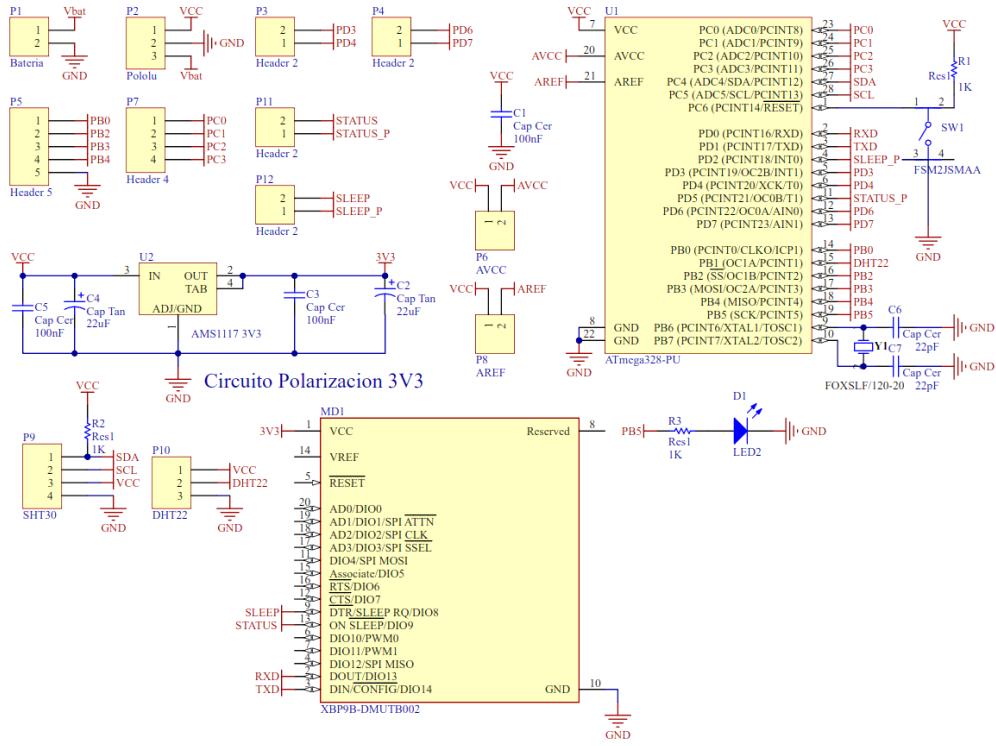


Figura 17. Circuito esquemático del nodo inalámbrico.



Figura 18. PCB del nodo inalámbrico.

3.3.10.2. Nodo central

Esta tarjeta cuenta con el conector de polarización del circuito, un módulo Xbee para recepción y envío de datos y un otro para envío de datos al servidor. Este nodo debe ser energizado por medio de baterías o de un tomacorriente mediante un cargador de 5V. Así mismo, se alimenta la tarjeta de desarrollo Nodemcu ESP32, ella realiza una conexión con la pantalla, memoria y alarma que conforman la interfaz gráfica de usuario local. De igual manera, es importante resaltar que la tarjeta de desarrollo permite enviar los datos recibidos mediante la conexión con el módulo Xbee coordinador de red a internet por medio de una conexión WiFi, esto con el fin de realizar la analítica de datos en el servidor de Thingspeak. Por último, en la figura 20 se puede observar el circuito impreso realizado para el nodo central del sistema en el que al igual que para el caso del nodo inalámbrico, se cuenta con un plano de tierra en la capa de *Top Overlay* de la PCB para reducir la interferencia y ruido externo.

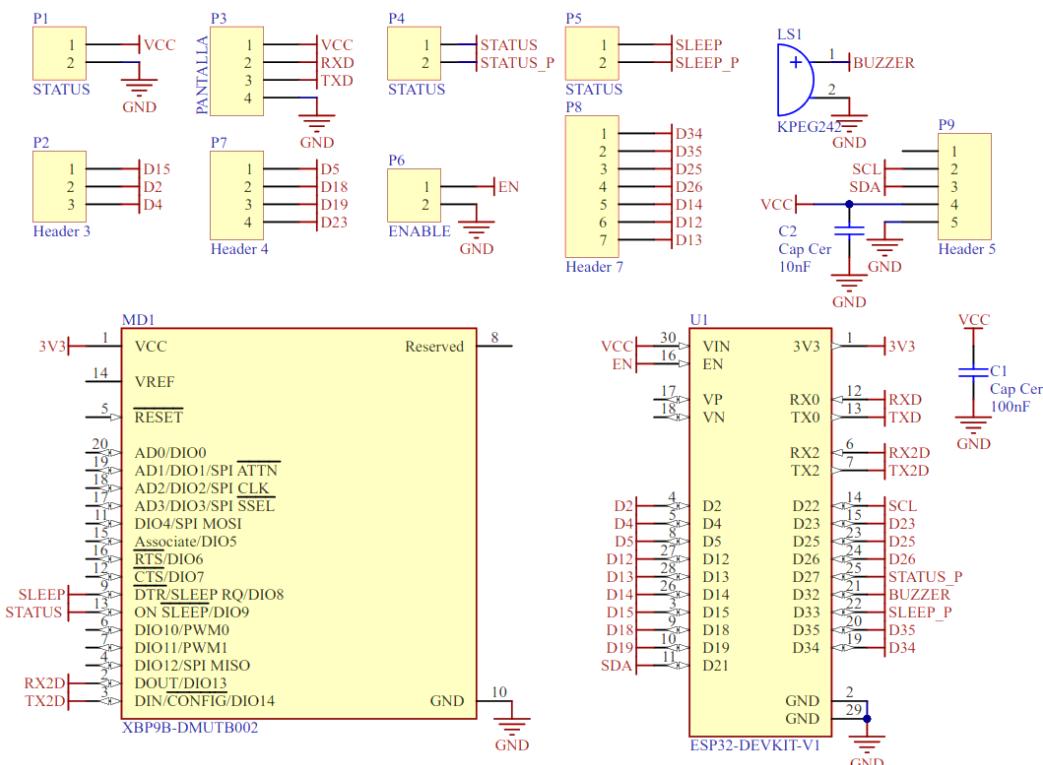


Figura 19. Circuito esquemático nodo central.

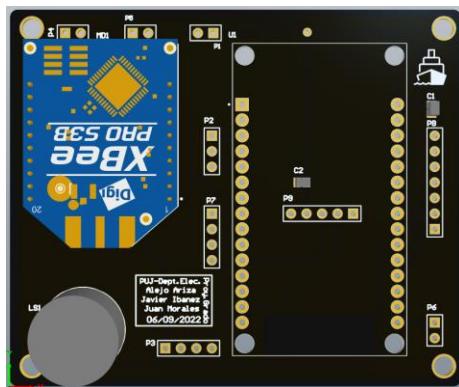


Figura 20. PCB del nodo central.

3.4. Diseño de Interfaz gráfica local

En esta interfaz se involucran diferentes funciones que buscan ayudar al agricultor a monitorear su cultivo sin necesidad de una conexión a internet. Al iniciarla se presentan 3 opciones de configuración: Ajuste manual de la hora, umbrales de alerta según el tipo de cultivo y por último la activación de ellas. La alarma se genera mediante una bocina la cual emite un sonido cuando un valor se ha salido de su rango configurado. Estas, se pueden desactivar o activar, así como ser observadas de manera gráfica mediante un indicador que indicará si se rebasó alguno de los límites. Estos rangos son configurables para permitirle al usuario ajustar los valores de acuerdo a las necesidades particulares que pueda indicar el tipo de cultivo, la región, entre otras.

Por otro lado, se cuenta con dos modos de visualización de datos del sistema. En el primero se muestran los datos en tiempo real, correspondientes a las mediciones que se efectúan en intervalos de 2 minutos. En el segundo modo se muestran los datos históricos, que permiten visualizar las mediciones de hasta 2 días atrás.

3.5. Diseño del Software

En la figura 21 se muestra el gráfico de la arquitectura general de funcionamiento del sistema, en donde en la parte izquierda de la figura se encuentran los bloques correspondientes al nodo inalámbrico y como estos interactúan. Así mismo en la parte derecha se observa cómo se recibe la transmisión serial e interactúan los bloques de funciones para finalmente enviarlo a pantalla y transmitirlo a la web.

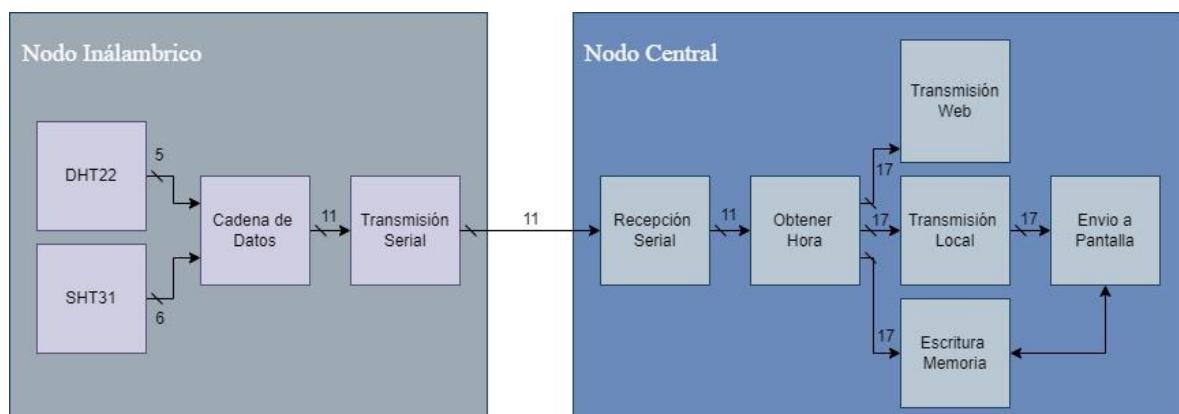


Figura 21. Esquema de software de los dispositivos.

3.5.1. Nodo inalámbrico

El software del nodo inalámbrico está diseñado para que realice la lectura de los sensores DHT22 y SHT31, lo cual se hace mediante las librerías “DHT.h” y “DFRobot_SHT3x.h” que realizan la comunicación 1-wire e I2C respectivamente. Una vez se tienen las mediciones de los sensores, se lleva a cabo la organización de la trama en la que los datos del sensor DHT22 están en la parte más significativa de la cadena empezando por la temperatura y seguida por la humedad. Así mismo, los datos del sensor SHT31 están en el mismo orden de temperatura y humedad, aunque en la parte menos significativa de la cadena de envío. Estos valores presentan dos cifras decimales y son separados uno del otro mediante una coma, ya que esto facilita la posterior lectura de los mismos. Finalmente, el Atmega328P realiza el envío de los datos mediante UART al módulo Xbee que actúa como dispositivo final en la red de comunicación inalámbrica cada 2 minutos, pues este es el tiempo estimado más conveniente para el sistema teniendo en cuenta las condiciones de los cultivos en las que no se presentan cambios abruptos de temperatura y aun cuando los haya se requiere de un análisis promedio amplio para determinar las acciones de control necesarias.

3.5.2. Nodo central

El software que fue diseñado para el nodo central está encargado de recibir la información transmitida por el nodo inalámbrico. En primer lugar, es necesario verificar si se encuentran datos disponibles almacenados en el buffer de recepción serial, cuando estos se encuentran disponibles se almacena la cadena de datos y se concatena la estampa de tiempo que permite saber con exactitud en qué momento se tomó el dato transmitido. Para obtener la estampa de tiempo se hace uso de la librería “Wire.h”, con la cual se establece una conexión por medio del protocolo I2C con un módulo de reloj en tiempo real RTC (por sus siglas en inglés) el cual suministra la hora y fecha exacta. Así mismo, haciendo uso de la librería "ThingSpeak.h" es posible transmitir la cadena de datos a la plataforma en la nube, escribiéndolos en un canal. Por otro lado, el dato recibido es transmitido por medio del protocolo de comunicación serial UART a una pantalla HMI, en ella se encuentra una interfaz local desde la cual se puede evidenciar la información recolectada, además el dato se almacena en memoria por medio del protocolo de comunicación I2C haciendo uso de la librería “Wire.h”.

3.5.3. GUI local

Mediante el software para la creación de GUI integrado con la pantalla Nextion se realizó el diseño gráfico de la interfaz, en este software se pueden arrastrar botones, cuadros de texto, variables numéricas, imágenes entre otros. A estos elementos se les asocia una acción determinada definida por una función en un lenguaje similar a Python, propio del fabricante. Estas acciones y objetos creados en la GUI luego pueden ser modificados por medio de la conexión serial, el controlador interno de esta pantalla recibe y envía información por el puerto serie que luego hará cambio de las variables vistas en pantalla o en las variables propias del algoritmo del dispositivo. Para esta aplicación se presentan varias secciones en pantalla, la primera posee cuatro botones que llevan a las demás páginas que contienen los modos que tiene esta interfaz, datos en tiempo real y datos históricos, además de la configuración del sistema. El ajuste de la hora, alarmas y umbrales es recibido por el microcontrolador como una trama por el puerto serial, luego este hace envío del conjunto de datos que contiene toda la información de los sensores para poder ser visualizada.

3.6. Diseño del empaquetado

Con base en el diseño de las tarjetas PCB mostradas anteriormente se realizó el diseño y fabricación de los empaquetados de los nodos. Es de vital importancia proteger los circuitos de manipulación externa, así como de factores tales como el agua y el polvo que puedan deteriorar, alterar o impactar en su correcto funcionamiento. En las figuras 22 y 23 se muestra el diseño 3D para

cada uno de los nodos del sistema de monitoreo. Los empaques fueron fabricados con PLA (ácido poliláctico), termoplástico a base de maíz o caña de azúcar, debido al bajo impacto ambiental que generan este tipo de empaques ecológicos en contraste con los materiales petroquímicos. Además, permite aislar correctamente el agua y el polvo para cumplir con el requerimiento de protección IP.

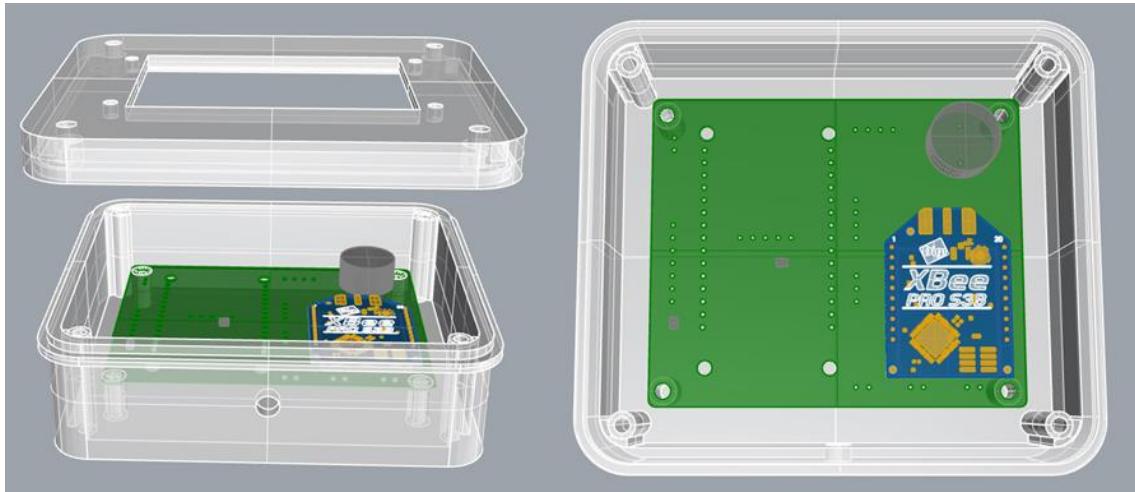


Figura 22. Diseño empaquetado nodo central.

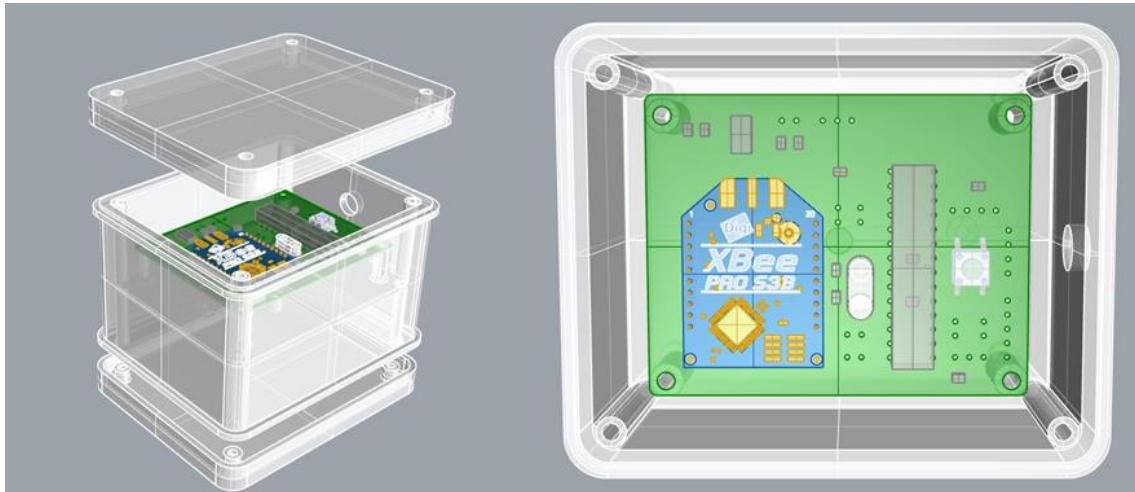


Figura 23. Diseño empaquetado nodo inalámbrico.

3.7. Analítica de datos

3.7.1. Descripción general

Para ejecutar el estudio de la información recolectada en la nube se hizo uso de la analítica descriptiva, con la cual es posible realizar un análisis preliminar con datos históricos los cuales proporcionan información útil que debe ser extraída para su posterior análisis. Los datos se analizan para describir tendencias, patrones y/o comportamientos que se hagan evidentes. La analítica descriptiva permite entender lo que sucedió en el pasado y de este modo comprender el actuar de los datos para poder asociar variables dependientes o intervenciones como elementos causales de cambios en las variables medidas. Las gráficas obtenidas luego de realizar la analítica de datos a partir del uso de la plataforma seleccionada en la sección 3.3.6, la cual permite el desarrollo de estas

mediante algoritmos codificados en Matlab. Las figuras se presentan en la página web dentro de la sección del *dashboard*, allí se clasifican en diferentes secciones para su visualización.

3.7.2. *Análisis en tiempo real*

Un componente fundamental dentro de un sistema de monitoreo agrícola es el seguimiento en tiempo real de las variables de interés, que para este caso son la temperatura y humedad tanto del ambiente como del suelo. Sin embargo, es importante considerar que este tipo de variables en condiciones normales no presentan una variación que sea significativa en unos segundos, por lo que las gráficas en tiempo real que se muestran al usuario corresponden a la última hora de mediciones, que son exactamente las últimas 30 mediciones de los sensores, ya que son enviadas del nodo central mediante el ESP32 a ThingSpeak cada 2 minutos. Así mismo, para una mejor comprensión y análisis de las variables, estas gráficas muestran las variables de temperatura y humedad en un mismo periodo de tiempo permitiendo evidenciar la relación entre ellas.

3.7.3. *Análisis de históricos*

Así como el seguimiento en tiempo real de las variables de un cultivo es importante, el monitoreo a lo largo de una escala de tiempo prolongada de unos cuantos días también lo es, ya que esto permite que los usuarios puedan evaluar los cambios en las plantaciones a partir de las acciones que se ejecuten a lo largo del tiempo, ya sea al aumentar o disminuir el riego, la mano de obra, etc. En este sentido, las gráficas de tiempo histórico que se muestran a los usuarios en este caso corresponden a 3 días, tiempo en el cual se puede establecer un análisis más confiable de las variables a partir de cambios dados ya sea en las condiciones climáticas o del cultivo en general, además de ser este un periodo de tiempo en el cual la cantidad de datos no es excesiva y se pueden visualizar adecuadamente.

3.7.4. *Máximos y mínimos relativos*

Teniendo en cuenta que los rangos tanto de temperatura como de humedad recomendados para un cultivo pueden variar significativamente dependiendo el tipo, es importante realizar un análisis de los datos mediante el cual se establezca en un periodo de tiempo las mediciones máximas y mínimas de cada variable, para determinar así la distancia existente entre los puntos críticos de las mediciones y sus puntos ideales teóricamente, para que los usuarios establezcan planes de acción con criterio. En este sentido, las gráficas de máximos y mínimos de cada variable presentan una escala de tiempo de las últimas 8 horas en las que se hayan obtenido mediciones.

3.7.5. *Promedio en días anteriores*

La información correspondiente de la temperatura y humedad del suelo al igual del ambiente de la última semana permite extraer información importante de como se ha comportado el cultivo, presentando un promedio de los últimos días con el cual se puede ver rápidamente la variación durante el transcurso de la semana, con esta información es más sencillo tomar decisiones a la hora de modificar la frecuencia del riego en el cultivo, o ejecutar acciones encaminadas a hacer cambiar el comportamiento de estas variables a lo largo de la semana, de forma que es más eficiente y preciso tomar estas decisiones teniendo datos suficientes como lo son de 7 días.

3.7.6. *Tendencias*

Por medio de una tendencia es posible analizar los comportamientos que pueden llegar a tener las variables ambientales, se realiza la media móvil de los datos para luego hallar la tendencia que permitirá conocer cómo podría comportarse el cultivo en la siguiente hora, permitiendo tomar acciones correctivas, como aumentar o disminuir el riego, entre otras. Se implementa una tendencia

para cada una de las variables medidas, además de un cuadro de texto, donde se da una sugerencia de acción para la siguiente hora con base en el comportamiento que haya tenido el cultivo en las últimas 8 horas, de manera que sea de fácil entendimiento y visualización sin que sea necesario para el usuario analizar los comportamientos detalladamente.

3.8. Desarrollo web

3.8.1. Descripción general

La página web se diseña con el objetivo de brindar una interfaz de usuario amigable especialmente con los agricultores, para facilitarles la visualización de la información, así como la toma de acciones necesarias en el cultivo. Teniendo en cuenta esta necesidad, se debe realizar la división en secciones de la información y organizarla con ayuda de un esquema de hojas de estilo en cascada CSS (por sus siglas en inglés), que permite gestionar la apariencia visual del sitio. Esta página web tiene un tamaño pequeño, no mayor a 50 Mb. Así como el uso de una base de datos SQL para la gestión de usuarios, el administrador de estas bases de datos es MySQL en su versión 5.7. También se ejecutan scripts de PHP para el envío de correos por medio del protocolo SMTP y la autenticación de los usuarios, para estos scripts se hace uso de la versión 8.0.24 de PHP. Es además necesaria la capacidad de gestión de correos, para esto se necesita un dominio propio que permita crear cuentas internas y enviar correos con este nombre. El tráfico del sitio web al ser un prototipo inicial no será muy grande por lo que la mayoría de los planes de alojamiento será suficiente, así como la velocidad que brinda cada uno de estos.

3.8.2. Selección del host.

El alojamiento web (a veces designado con el término equivalente en inglés *hosting*) es un servicio que brinda a los usuarios de internet un espacio conocido como *webspace*, en el que se puede publicar el contenido de un sitio web [41][301]. En este sentido, según los autores en [42] es fundamental seleccionar un hosting que satisfaga los requerimientos mencionados en el apartado anterior en términos de espacio en disco, bases de datos, tráfico, etc. Siendo importante considerar también los tipos de alojamiento existentes que son: compartido, VPS, independiente y *Cloud*. Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó el hosting de 125mb.com el cual tiene como principal ventaja respecto a otros alojamientos web, una versión gratuita que permite la publicación del contenido web usando servicios de bases de datos mediante MySQL, siendo un factor de gran importancia ya que sin realizar previamente el pago se puede visualizar completamente la página, con el *login* y registro funcional, la interfaz gráfica web y las animaciones generales. Así mismo, en la tabla 13 a continuación se muestran las características principales de la versión paga del hosting, el cual fue seleccionado para un mejor desempeño del sitio web, siendo un plan de alojamiento compartido, pero con una gran disponibilidad de recursos que son suficientes para cumplir con los requerimientos de la página web desarrollada para este proyecto. Dentro de las características que ofrece el servicio contratado por 10 dólares durante el primer año, resaltan el espacio en disco, el tráfico y las cuentas FTP que son ilimitadas, así como la posibilidad de incluir 2 dominios con 5 subdominios, los cuales pueden contar con la gestión de hasta 7 bases de datos mediante MySQL y PostgreSQL con un espacio de almacenamiento de 100 MB y 50 MB respectivamente. De igual manera, este servicio de alojamiento cuenta con el protocolo SMTP que es fundamental para el enlace con el correo electrónico de soporte, mediante el cual los usuarios pueden ponerse en contacto para peticiones como el cambio de contraseña y servicios generales.

Tabla 13. Características principales del servicio de alojamiento web contratado.

Características del host 125 MB					
Espacio en disco	Trafico mensual	Dominios	Subdominios	Bases de datos	Garantía T. de actividad
Ilimitado	Ilimitado	2	5	MySQL / Postgre SQL	99,80%

3.8.3. Diseño de la página principal.

Luego de haber realizado la selección del host web se procedió a diseñar la página principal que está compuesta en primera instancia por la imagen de bienvenida, esta muestra el logo de Smart Farm y recibe al usuario con mensajes de entrada que le brindan una primera noción del producto. Además, aquí le permite al usuario iniciar sesión, o explorar el contenido de la página web. Luego de esto se pueden ver diferentes secciones, las cuales transmiten información importante acerca del producto que se ofrece. La página está compuesta por diferentes secciones: acerca del producto, los servicios disponibles, imágenes referentes al sistema, como impacta el producto a nivel social y tecnológico, el equipo de desarrollo y la sección de contacto.

3.8.4. Administración de usuarios.

Para poder gestionar los usuarios es necesario una base de datos donde será almacenada y gestionada la información de cada uno. Esta base de datos se divide en dos tablas, la primera con la información básica de los usuarios: Nombre, correo, usuario, contraseña encriptada y un número identificador, luego la otra tabla se utiliza para recuperar la contraseña de los usuarios ya existentes, almacenando tanto el correo electrónico de la persona que hace la solicitud y a esta se le asigna una llave, que consiste en un código encriptado de un solo uso. Con las bases de datos se realizan scripts en PHP que facilitan entre otras: Permitir la visualización o no, dependiendo de los permisos que tenga cada usuario de ciertas páginas e información relacionada a cada cultivo, el envío de mensajes de tipo HTML para recuperar la contraseña, entre otras características. Dentro de estos scripts de PHP se incluyen líneas de código llamadas *Queries* o consultas de SQL, estas lo que permiten es realizar acciones sobre la base de datos, como preguntar por usuarios, cambiar información de estos, insertar nueva información en la base de datos etc. Cuando un usuario hace uso de la función de recuperar contraseña se hace una consulta en la base de datos para saber si este existe o no, luego se le asigna una llave que es enviada por medio de correo electrónico mediante un enlace de único acceso, esta llave tiene una validez de un día en la que el internauta será redirigido a un formulario donde podrá crear una nueva contraseña.

3.8.5. Dashboard

Luego de que se verifica correctamente el inicio de sesión el usuario podrá ver en la sección *Home* las gráficas correspondientes a temperatura y humedad tanto del ambiente como del suelo, estas graficas se muestran en tiempo real, así como los datos históricos recolectados. Además, se muestran las gráficas de máximos y mínimos en las mediciones durante el transcurso del día, de modo que para el usuario final es fácil identificar los picos en las mediciones, en qué hora del día sucedieron, y como estos valores críticos pueden llegar a influir en el cultivo.

La sección de históricos está compuesta por gráficas que contienen información de las mediciones de los últimos 7 días y calcula en una línea punteada el promedio de datos de las mediciones realizadas, este promedio se realiza para cada una de las variables monitoreadas. Así mismo se muestran, gráficas en las cuales se realiza una analítica de datos básica para establecer cómo se comporta la tendencia de los datos que son monitoreados y si estos tenderán a aumentar o disminuir

su medición, por último, se muestran mensajes que le informan al usuario si la tendencia de la medición se encuentra al alza o a la baja y una recomendación para hacer riego o no en el cultivo.

También se muestra una sección de información la cual le aporta al usuario información más técnica del dispositivo, esta contiene videos informativos y explicativos del producto. Adicionalmente se cuenta con una sección de soporte desde la cual el cliente se puede comunicar con el equipo de desarrollo de Smart Farm para resolver inquietudes acerca del uso del producto, así como eventuales contratiempos que se le presenten en su sistema.

El desarrollo de esta página fue realizado en HTML, además se hizo uso de CSS para dar forma estética a la página, así como JavaScript para agregar movimiento y dinamismo, para poder visualizar las gráficas en tiempo real fue necesario incluir éstas haciendo uso de la función iframe que es un atributo que se utiliza para incluir un documento HTML dentro de otro. Puede encontrarlo en etiquetas de enlace (link) que en este caso las proveen el servidor ThingSpeak.

4. Implementación e instalación

4.1. Descripción general

Para la instalación del sistema de monitoreo, es necesario considerar las adecuaciones realizadas a los nodos central e inalámbrico que se presentaron en el diseño del empaquetado ya que en primer lugar, el nodo inalámbrico se ubica en medio del cultivo haciendo uso de una repisa que se instala en una parte de la estructura del invernadero a una distancia aproximada del suelo de 0.5 m, la cual permite que el sensor de tierra sea introducido en uno de los surcos a una profundidad de 30 cm que es una profundidad en la que se encuentran las raíces de la planta según [43] y como muestran los autores en [44] esta profundidad es óptima para estimar la humedad en la tierra al tener un solo sensor. Por otra parte, el sensor del ambiente se acopla a la misma parte de la estructura a una distancia vertical aproximada de 0.3 m respecto a la repisa, así mismo el empaquetado se posiciona de manera tal que los usuarios pueden fácilmente acceder a las baterías del nodo por medio de una tapa ajustada por tornillos. Por último, es importante resaltar que el sensor ambiental se encuentra al aire libre ya que el cultivo en el que se instalará el sistema cuenta con invernaderos, de no ser de este modo se requeriría de un pequeño empaque adicional para protegerlo del agua lluvia.

Por otra parte, el nodo central del sistema fue diseñado con el objetivo de que los usuarios del cultivo puedan usarlo cómoda y fácilmente desde su hogar, dadas las condiciones difíciles que se encuentran en la mayoría de los cultivos. De este modo, el nodo central en el que se encuentra la interfaz gráfica de usuario local se instala en una de las paredes cercanas de la casa en donde se encuentra el cultivo, a una distancia próxima del router que permite la conexión a internet.

4.2. Protocolo de pruebas

En el anexo 10.1 se presenta el protocolo de pruebas detallado con los equipos utilizados y los procedimientos necesarios para corroborar el correcto funcionamiento del sistema.

5. Resultados

5.1. Interfaz local



Figura 24. Inicio y de visualización en vivo.



Figura 25. Históricos y configuración.



Figura 26. Configuración de umbrales.



Figura 27. Configuración de alertas y hora.

5.2. Dispositivos finales



Figura 28. Dispositivo de nodo central.



Figura 29. Dispositivo de nodo inalámbrico.

5.3. Instalación en campo



Figura 30. Visita de la USAID al cultivo de fresa. Tomada de [45].



Figura 31. Equipo de trabajo en campo.



Figura 32. Montaje del sistema en el cultivo.

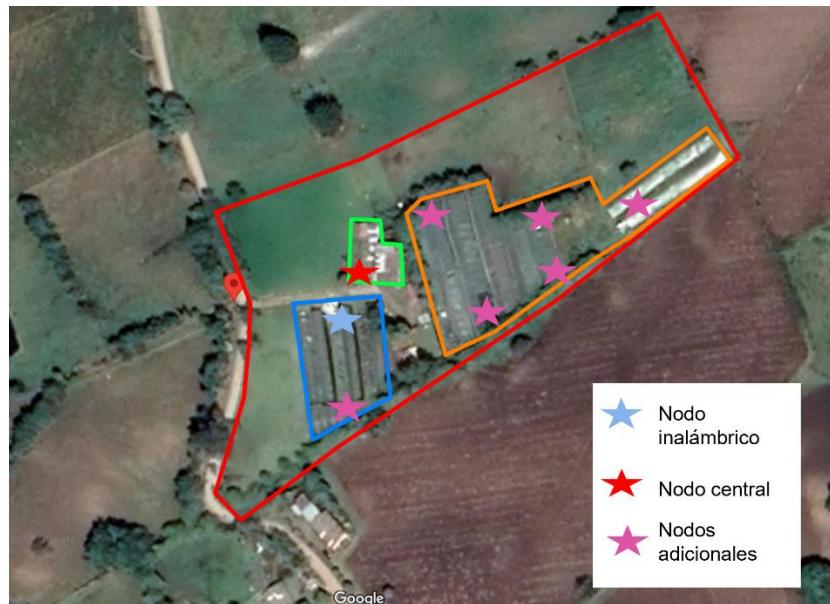


Figura 33. Ubicación del nodo, y posibilidades.

Tabla 14. Presupuesto de trabajo.

Presupuesto				
Nombre del recurso	Tipo	Tasa estandar	Cantidad (Horas)	Costo
Horas de trabajo estudiantes	Trabajo	\$ 10.000,00	4320	\$ 43.200.000,00
Horas de trabajo ingenieros	Trabajo	\$ 120.000,00	50	\$ 6.000.000,00
Componentes electronicos	Material	\$ 700.000,00		\$ 700.000,00
Impresos (PCB)	Material	\$ 200.000,00		\$ 200.000,00
Cajas de proteccion	Material	\$ 150.000,00		\$ 150.000,00
Software	Uso	\$ 3.000.000,00		\$ 3.000.000,00
Equipos de laboratorio	Uso	\$ 600.000,00		\$ 600.000,00
Transportes	Gasto	\$ 120.000,00		\$ 120.000,00
			Total	\$ 53.970.000,00

5.4. Analítica en la nube

5.4.1. Tiempo real

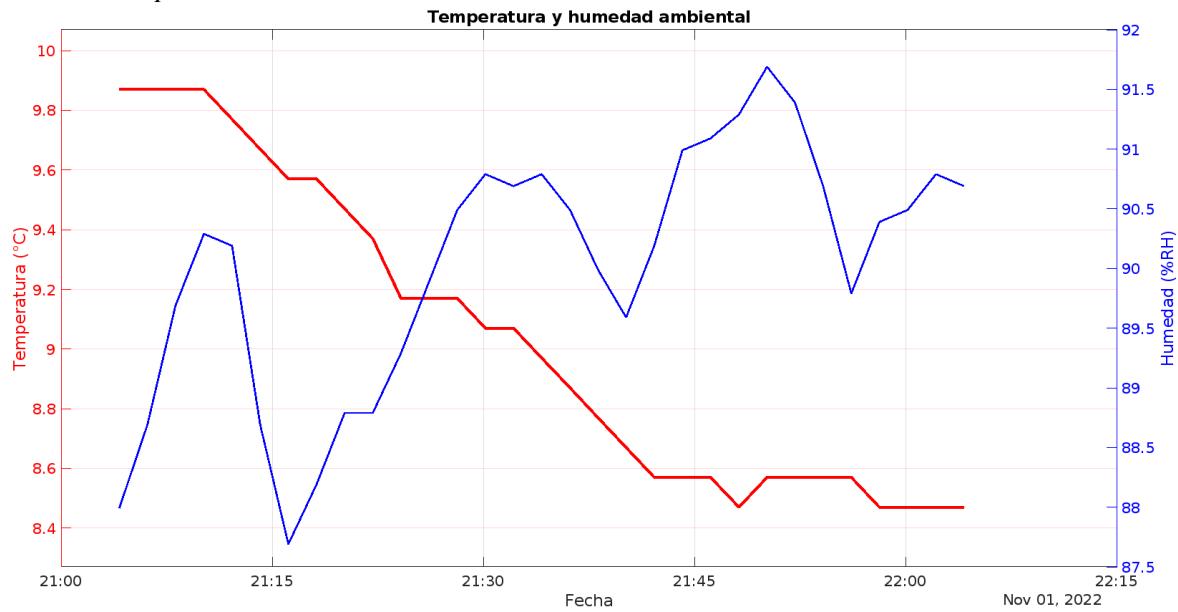


Figura 34. Montaje del sistema en el cultivo.

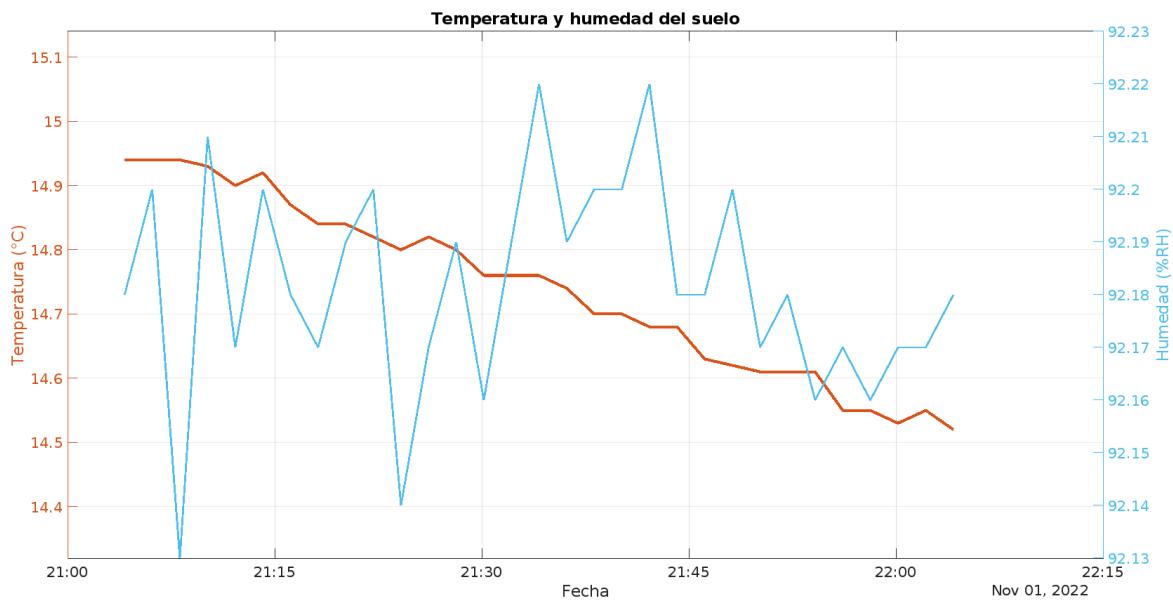


Figura 35. Montaje del sistema en el cultivo.

5.4.2. Históricos

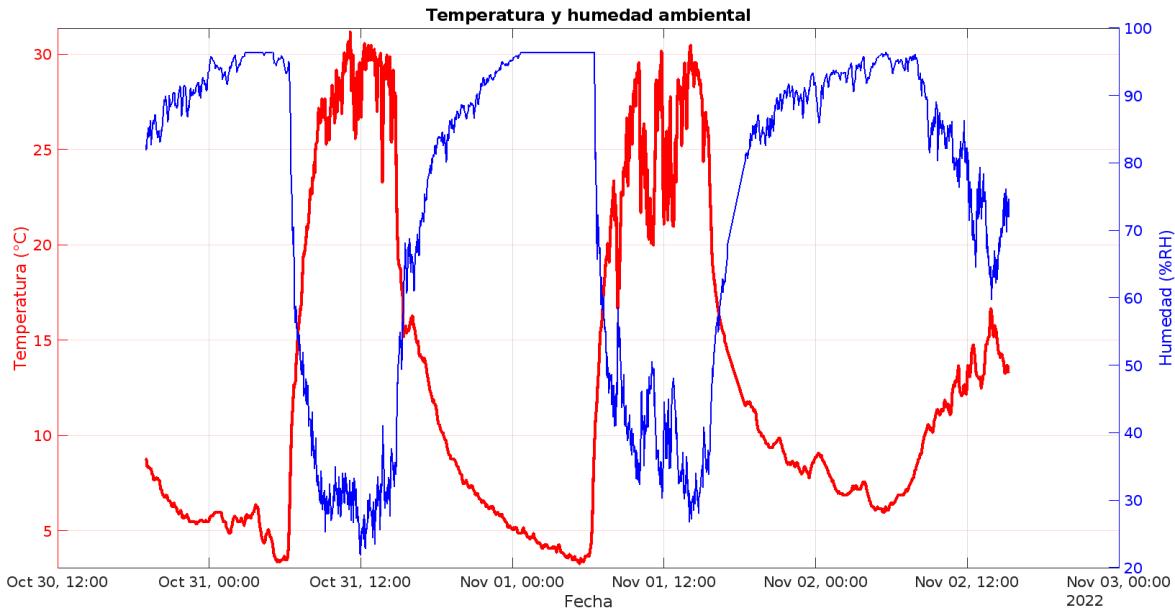


Figura 36. Montaje del sistema en el cultivo.

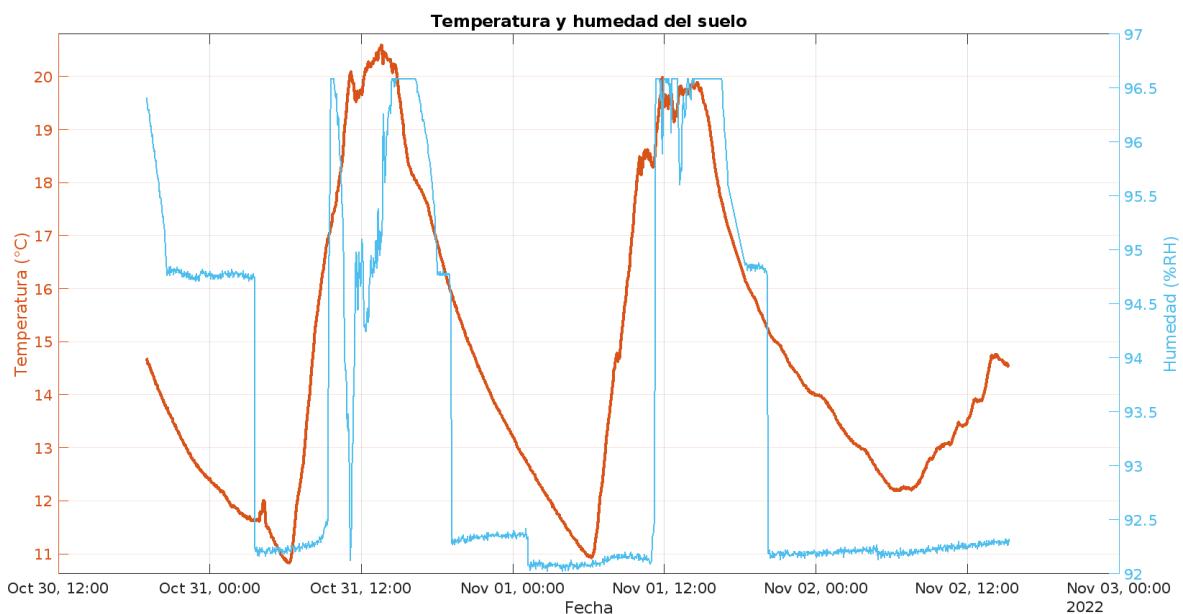


Figura 37. Montaje del sistema en el cultivo.

5.4.3. Máximos y mínimos relativos

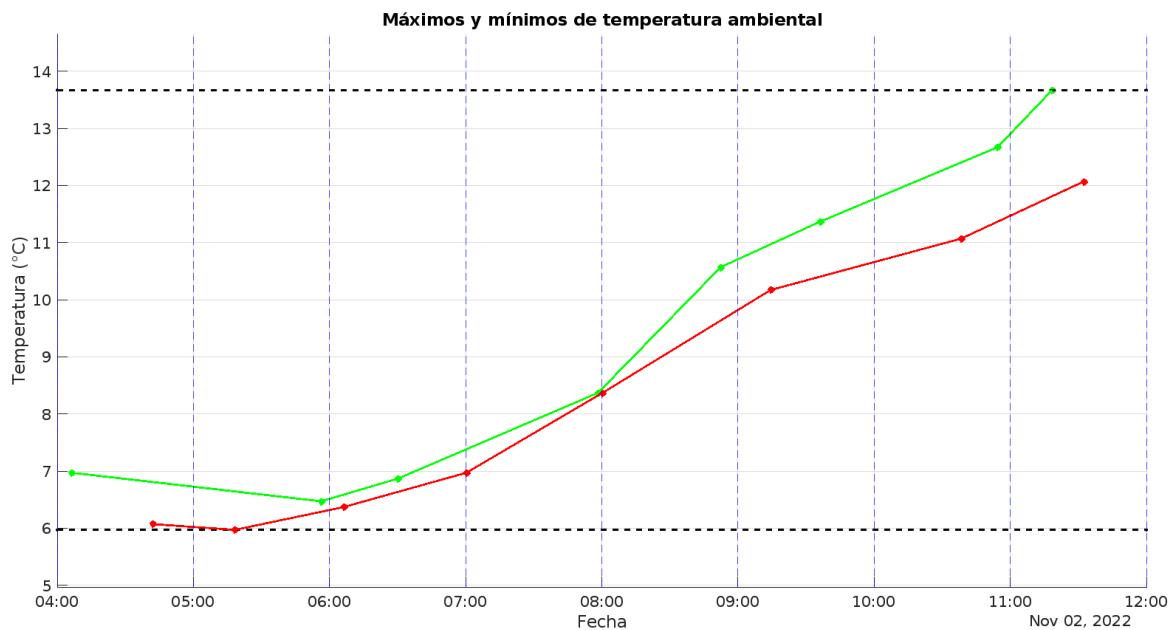


Figura 38. Montaje del sistema en el cultivo.

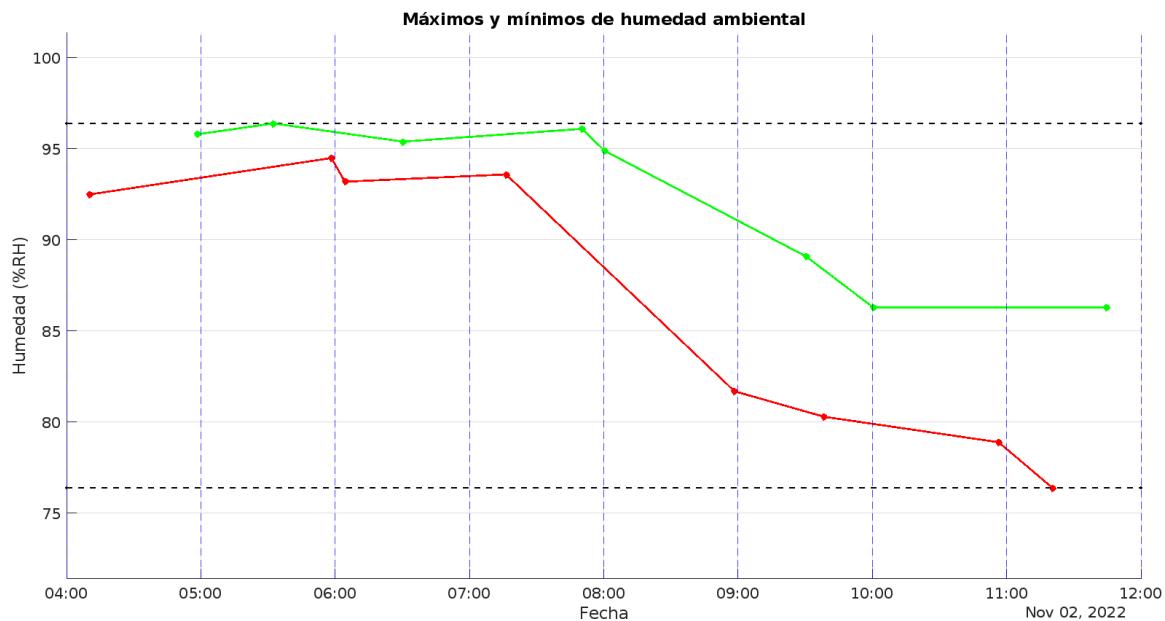


Figura 39. Montaje del sistema en el cultivo.

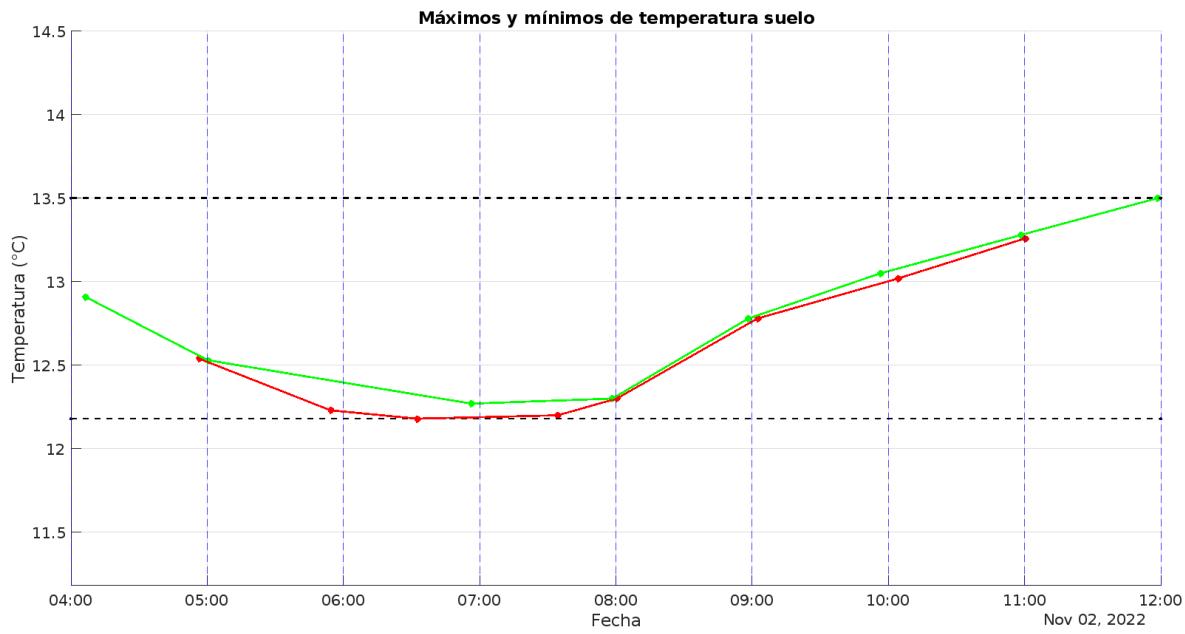


Figura 40. Montaje del sistema en el cultivo.

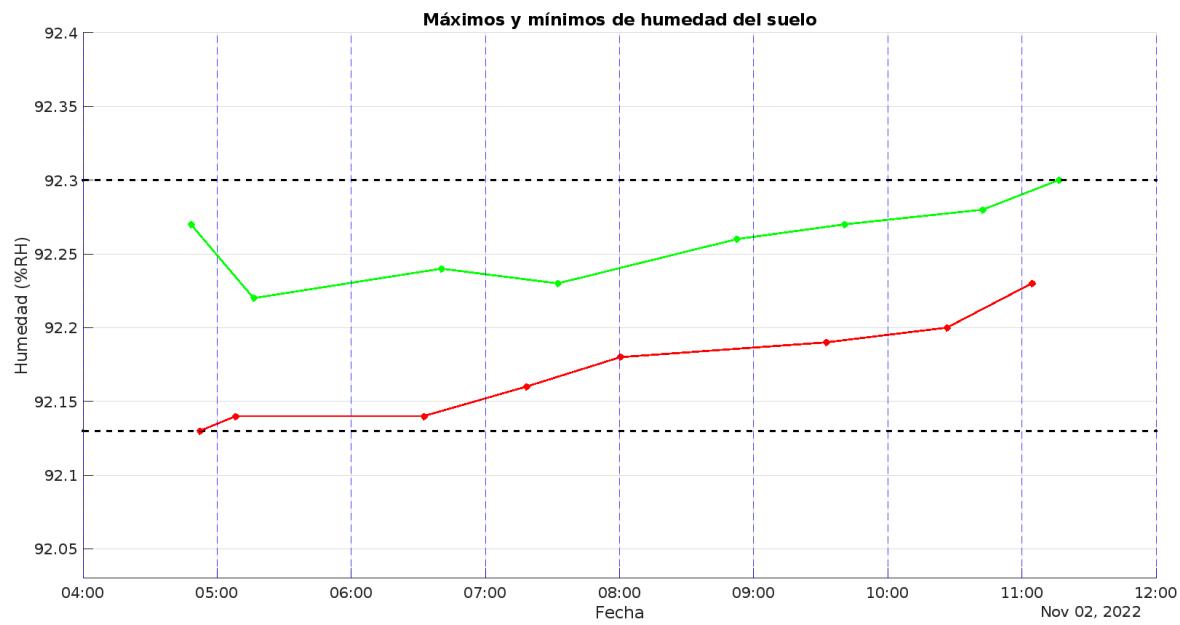


Figura 41. Montaje del sistema en el cultivo.

5.4.4. Promedios por día

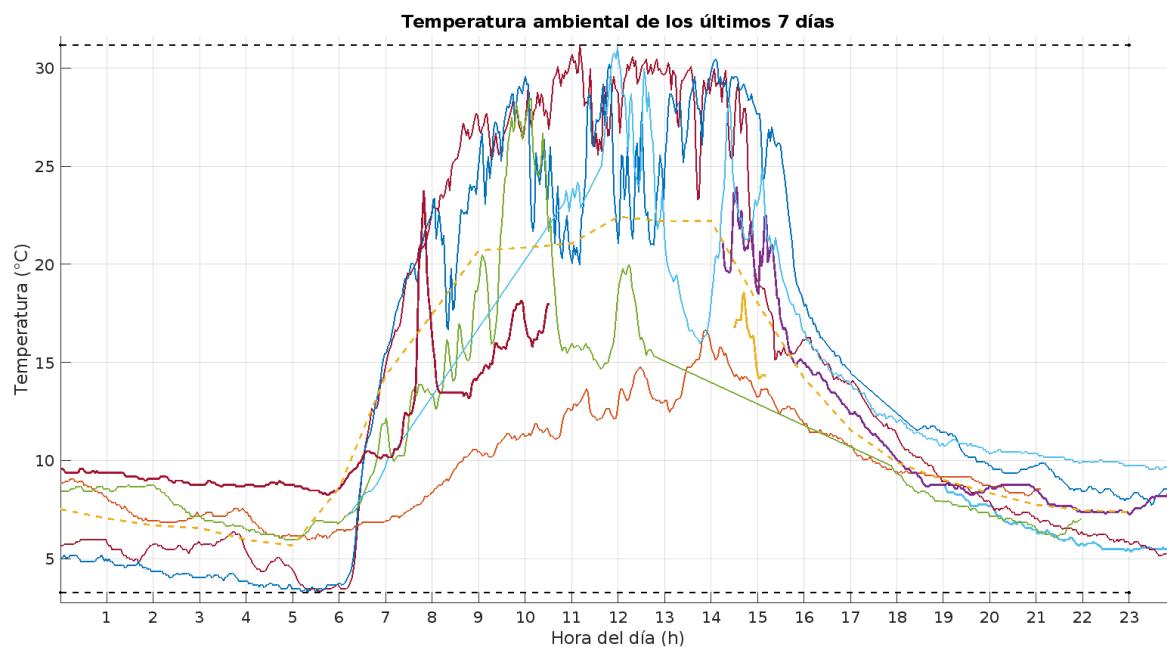


Figura 42. Temperatura del ambiente últimos 7 días.

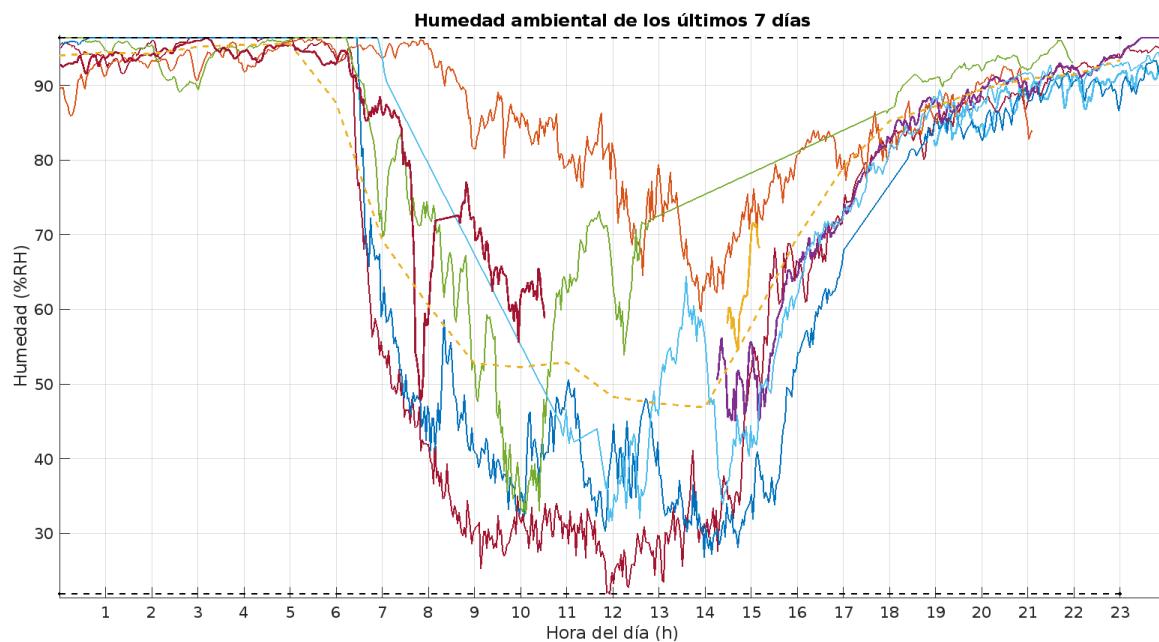


Figura 43. Humedad del ambiente últimos 7 días.

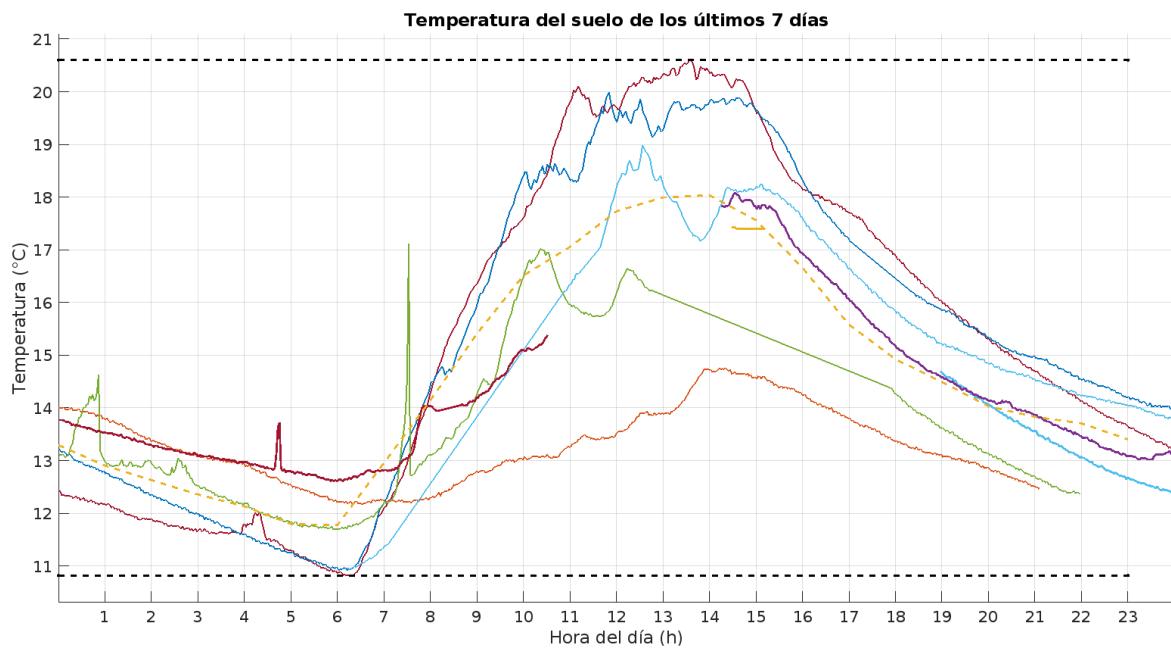


Figura 44. Temperatura del suelo últimos 7 días.

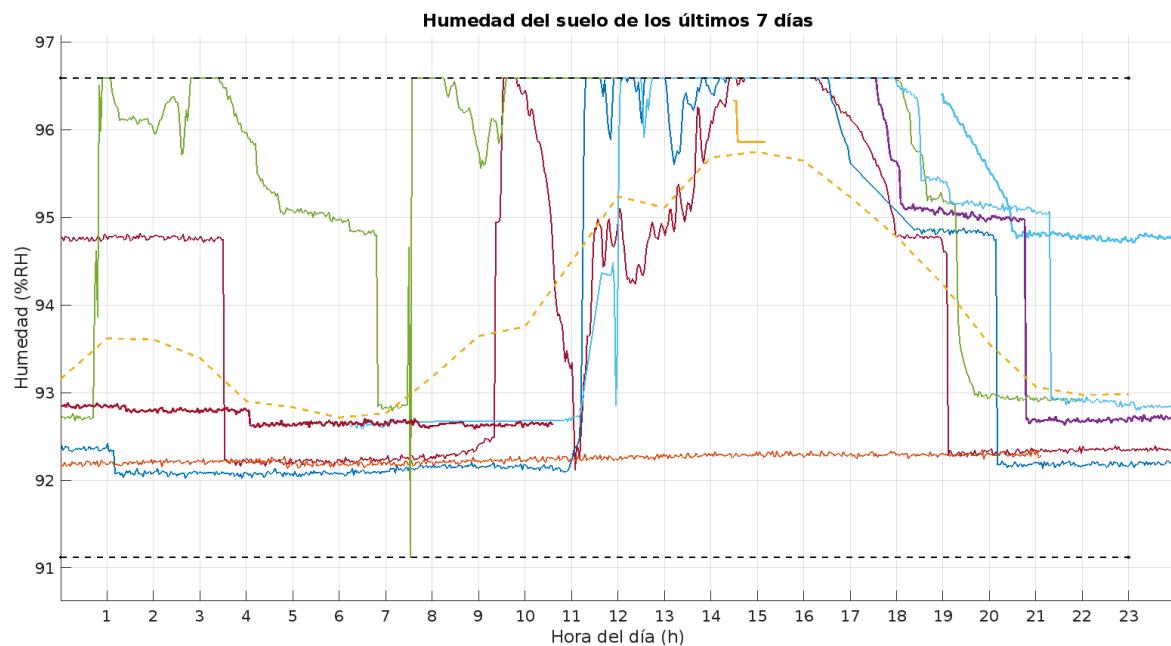


Figura 45. Humedad del suelo últimos 7 días.

5.4.5. Tendencias

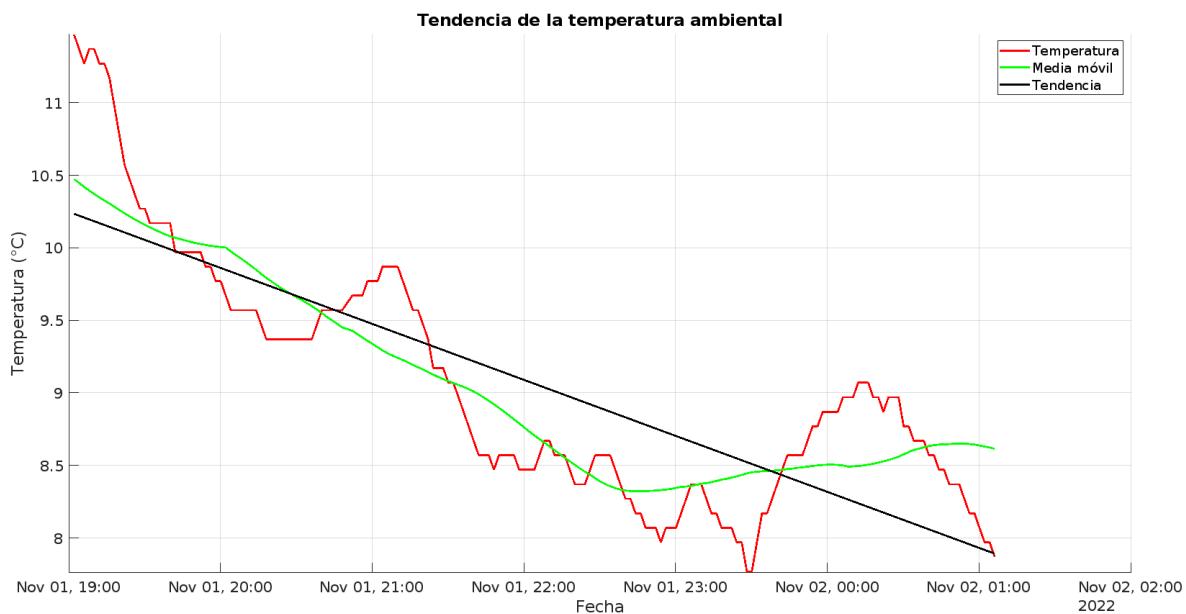


Figura 46. Tendencia temperatura del ambiente.

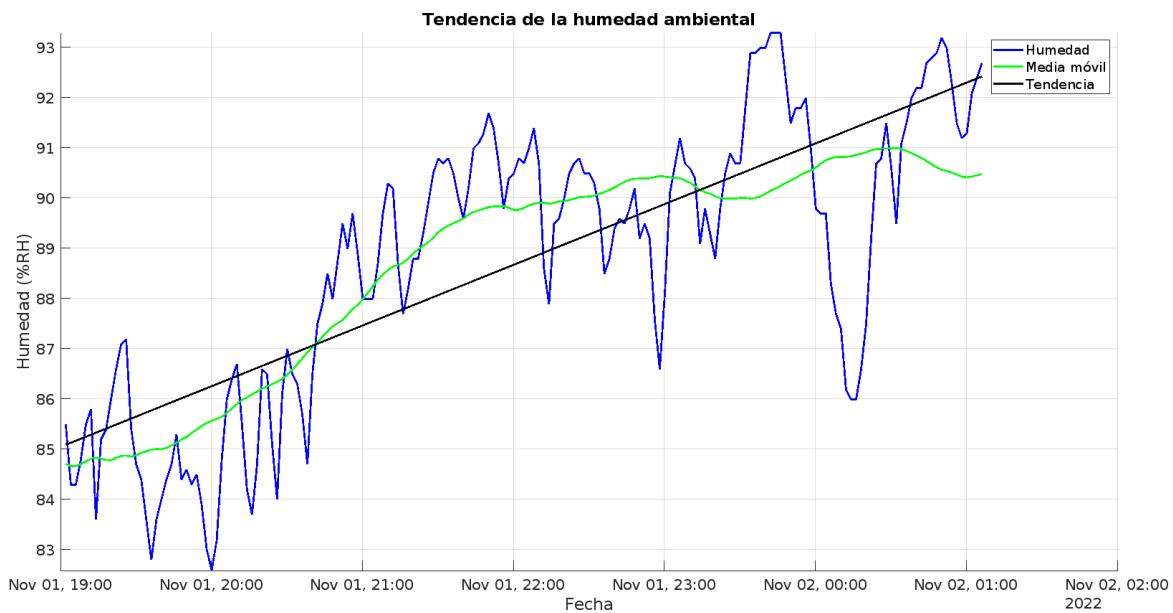


Figura 47. Tendencia humedad del ambiente.

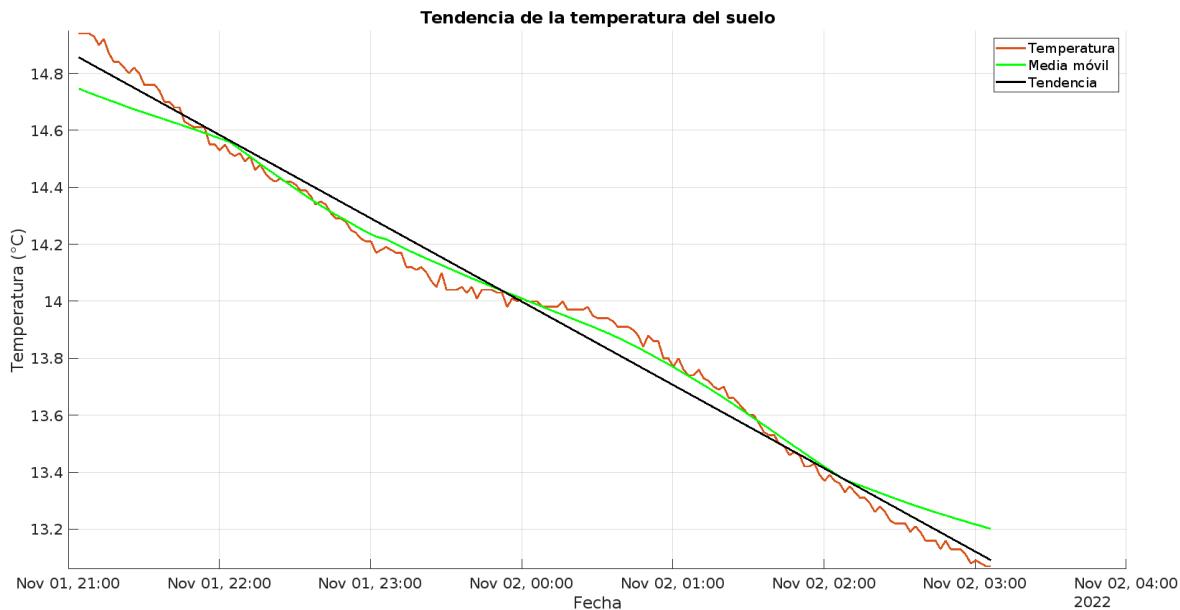


Figura 48. Tendencia temperatura del suelo.

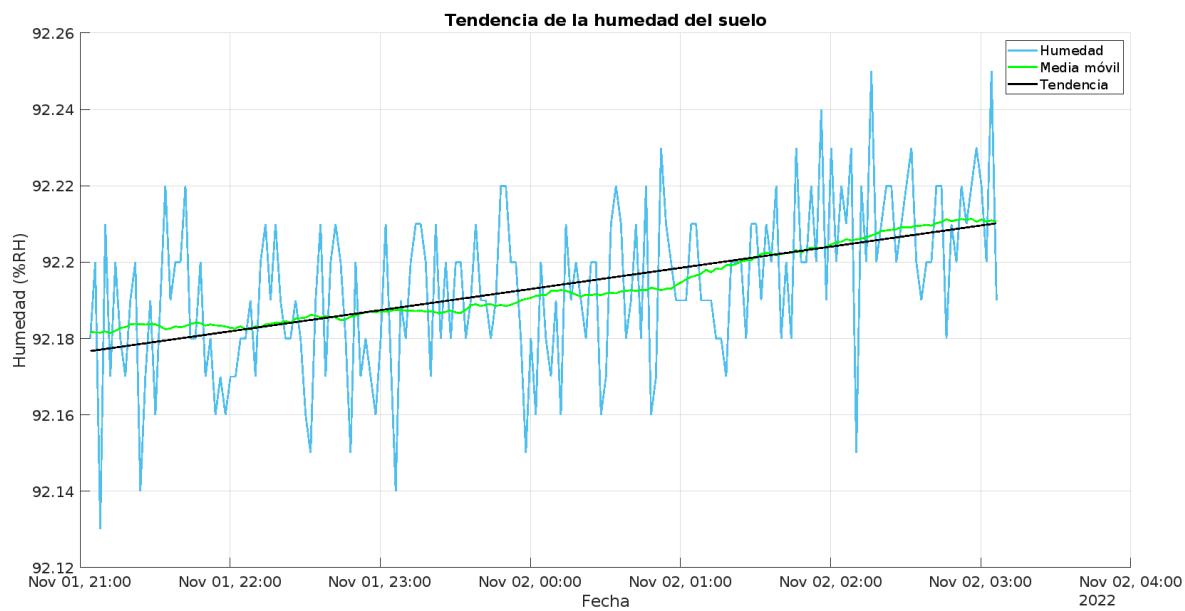


Figura 49. Tendencia humedad del suelo.



Figura 50. Sugerencia del ambiente.

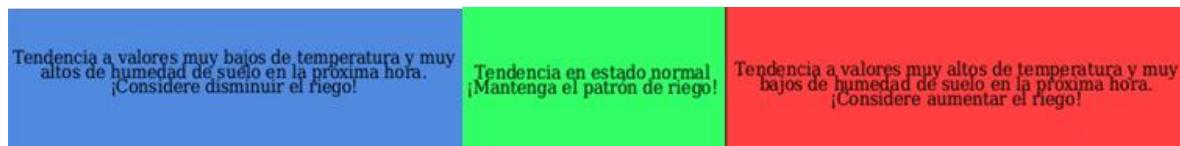


Figura 51. Sugerencia del suelo.

5.4.6. Ajuste para la humedad del suelo

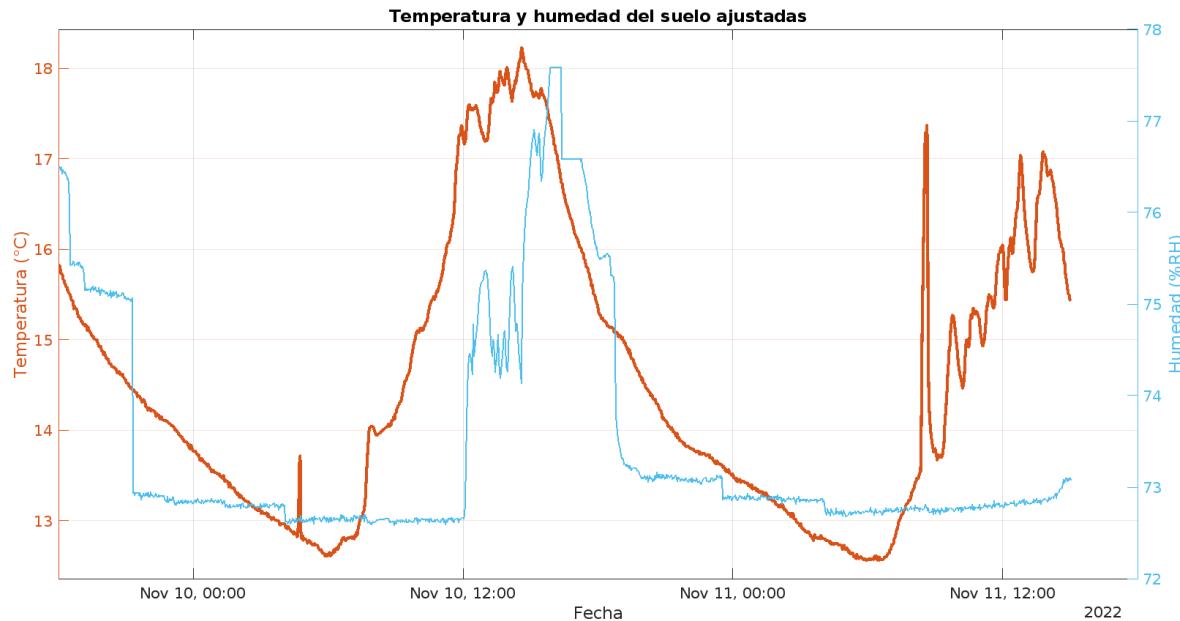


Figura 52. Ajuste de temperatura y humedad del suelo.

5.5. Consumo del sistema

Tabla 15. Consumo experimental laboratorio.

Consumo experimental		
Nodo central (mA)	Nodo inalámbrico	
	Sleep (mA)	Activo (mA)
227.65	25.49	79.18

Tabla 16. Cálculo de la duración de las baterías.

Consumo del nodo inalámbrico						
T.Activo/hora (s)	T.Sleep/hora (s)	Cantidad baterías	Capacidad baterías (A)	Duración sleep(h)	Duración activa(h)	Duración equivalente
30	3570	4	4,80	188,3091	60,6214	186,2347

5.6. Página web

5.6.1. Principal



Figura 53. Sección de inicio y acerca de.

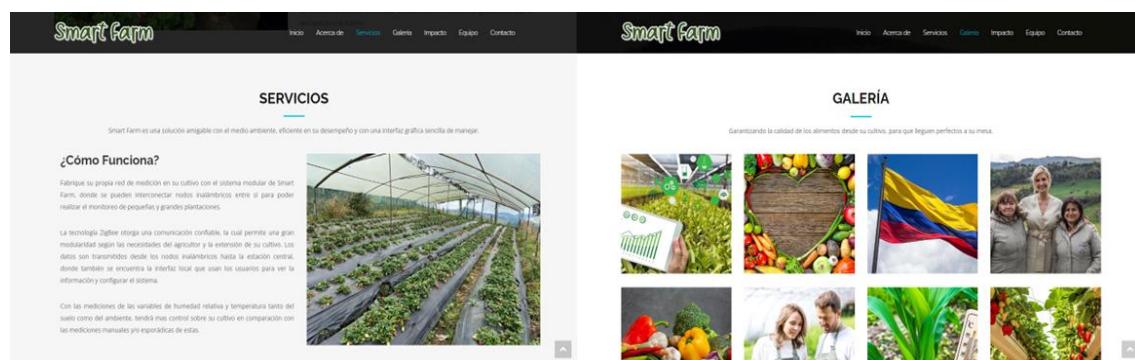


Figura 54. Sección de servicios y galería.



Figura 55. Sección de impacto.

The image shows two side-by-side screenshots of the Smart Farm website. The left screenshot displays the 'NUESTRO EQUIPO DE TRABAJO' (Our Work Team) section, featuring three team members: Alejandro Ariza, Javier Roldán, and Juan Morales, each with their profile picture, name, title ('Ingenieros Electrónicos'), and LinkedIn link. The right screenshot shows the 'CONTÁCTANOS' (Contact Us) section, which includes a map pin indicating the location as 'Pepita Universidad Javeriana Bogotá, Colombia 110231', email ('soporte@smartfarm.com'), phone number ('+57 310 796 05 42'), and a message input field with a 'Enviar mensaje' (Send message) button.

Figura 56. Sección de equipo de trabajo y contacto.

5.6.2. Registro e inicio de sesión

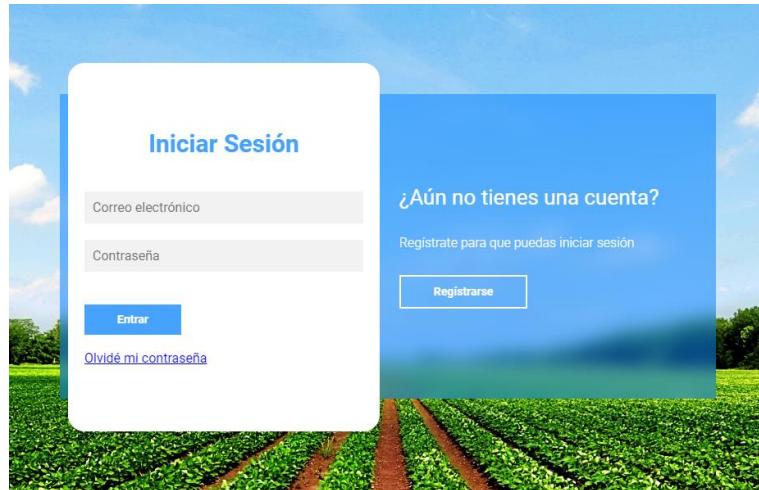


Figura 57. Gestión de usuarios, registro e inicio de sesión.

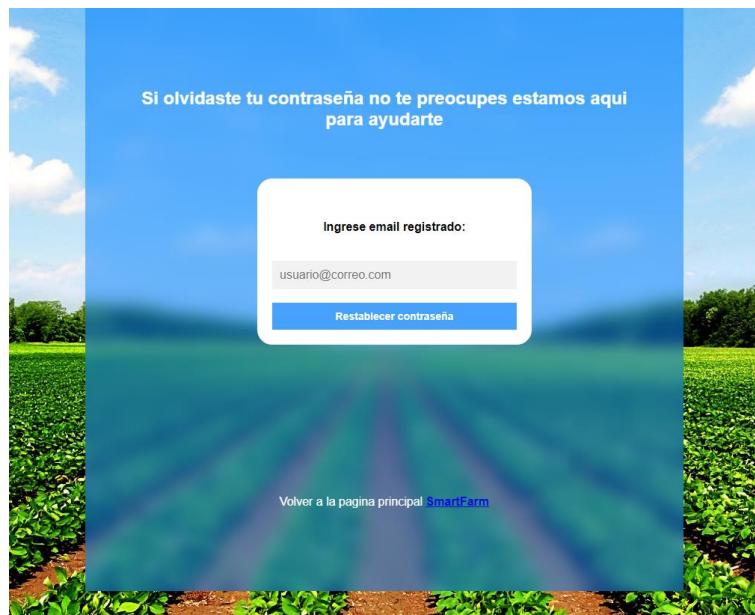


Figura 58. Recuperación de contraseña.

5.6.3. Interfaz gráfica web



Figura 59. Dashboard web no vinculado a los dispositivos.



Figura 60. Dashboard web vinculado a los dispositivos.

5.7. Riego

Tabla 17. Cantidad de recurso hídrico que consume el cultivo.

Registro del consumo de agua en cultivo									
Mes:				Septiembre - Octubre					
Día	Hora	Consumo (M3)		Día	Hora	Consumo (M3)			
		Mañana	Tarde			Mañana	Tarde		
9/23/2022	9:45	16:10	2	1.8	10/10/2022	9:05	16:50	2	2
9/24/2022	9:10	17:12	2	1.8	10/11/2022	10:06	16:48	2	2
9/25/2022	9:02	16:38	2	1.8	10/12/2022	8:36	15:48	2	2
9/26/2022	9:50	16:45	2	2	10/13/2022	9:11	16:36	2	1.8
9/27/2022	9:15	17:25	2	1.8	10/14/2022	8:36	17:26	2	1.8
9/28/2022	9:22	16:36	2	1.8	10/15/2022	8:39	16:25	2	2
9/29/2022	8:56	16:45	2	2	10/16/2022	8:48	17:12	2	2
9/30/2022	9:15	15:50	2	2	10/17/2022	8:56	16:48	2	2
10/01/2022	9:16	16:50	2	2	10/18/2022	9:12	16:52	2	2
10/02/2022	8:46	17:15	2	2	10/19/2022	8:36	17:04	2	1.8

10/03/2022	8:57	16:36	2	2	10/20/2022	9:54	17:26	2	1.8
10/04/2022	8:51	15:50	2	2	10/21/2022	8:38	16:50	2	2
10/05/2022	8:54	16:58	2	2	10/22/2022	8:54	16:26	2	2
10/06/2022	9:16	15:57	2	2	10/23/2022	9:36	16:53	2	2
10/07/2022	9:08	16:36	2	2	10/24/2022	8:50	16:25	2	2
10/08/2022	8:56	16:40	2	2	10/25/2022	8:26	16:48	2	2
10/09/2022	9:13	17:36	2	2					

Tabla 18. Análisis del comportamiento del riego del cultivo antes de la instalación.

Hora de activación (h)		Consumo de agua (M3)		Diferencias promedio (h)	
Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana - Tarde	Tarde - Mañana
9:05	16:44	2.00	1.95	7:38	16:21
		Total:	3.95		

6. Análisis de resultados

6.1. Interfaz local

Esta cuenta con una pantalla táctil que permite acceder a diferentes páginas, con las cuales se puede hacer uso del sistema de manera intuitiva por medio de botones y textos, en este punto la creatividad fue de vital importancia dado que el software de diseño permite insertar imágenes y por medio de estas se creó toda la interfaz. En la figura 24 se observa la página inicial donde el usuario cuenta con cuatro opciones, ajustes, soporte, apagado e inicio. En el botón de inicio se encuentran inmersas otras dos características: Datos en vivo e Históricos. En la primera se ven los datos cada vez que se actualizan desde el nodo inalámbrico como se ve en la figura 24, mientras que en los históricos se observan los datos que son almacenados en memoria para que el agricultor pueda ver como estuvieron las variables ambientales del cultivo en un rango de tiempo de 48 horas previas, tal como se puede ver en la figura 25. En la opción de ajustes se encuentran otros 3 botones que permiten la adaptación del sistema a cualquier tipo de cultivo, allí se presentan opciones tales como la configuración de la hora, la cual envía la trama con la información al microcontrolador y este se encarga de realizar dicho ajuste en el módulo RTC, como se puede observar en la figura 25. Por otro lado, como se observa en la figura 26 se cuenta con la posibilidad de configurar los umbrales de alerta teniendo las dos opciones de variables, tanto del ambiente como del suelo, en esta página el usuario puede configurar manualmente con los botones táctiles los rangos que deben activar las alertas. Esto puede variar dependiendo de la cosecha, para el caso de las fresas puede cambiar inclusive dependiendo del tipo de cultivo ya que puede ser en invernaderos, al aire libre, elevado, entre otros. Por esta razón, se planteó que el sistema fuera versátil para adaptarse fácilmente a cualquier tipo de cultivo y de producto a cosechar. Por último, en la figura 27 se puede observar la visualización y configuración de las alertas, en este apartado el agricultor puede ajustar si desea o no activarlas cuando se superen los umbrales configurados anteriormente, además puede ver cuál de las variables ambientales se encuentra por fuera de su rango y si lo está por un límite inferior o superior.

La interfaz local fue diseñada en el software incluido por el fabricante Nextion, el cual permitió la creación de botones, y la inclusión de imágenes a color para que fuera agradable para el

usuario, con el objetivo de que fuera llamativo y familiar para estos. Una vez instalado el dispositivo se realizó la prueba con 10 personas sin conocimiento previo del sistema, 8 de estas entendieron intuitivamente cómo usar esta interfaz sin ningún tipo de ayuda. Para las otras 2 personas fue necesario realizar una explicación sencilla en algunos apartados para que la usarán completamente, sin embargo, en la página web se presenta un video ilustrativo de cómo utilizar el sistema, con el objetivo de que las personas que no entiendan el funcionamiento de la interfaz local tengan una ayuda paso a paso para que así puedan hacer correcto uso del sistema.

6.2. Dispositivos finales

El empaquetado final diseñado en la sección 3.6. para el nodo central se observa en la figura 28, este cuenta con dimensiones de 9.8 cm por 8.6 cm por 3.57 cm e integra la PCB diseñada en la sección 3.3.10.2, que se conforma por diferentes elementos electrónicos, así como por la pantalla Nextion NX3224T024_01 que se encuentra fijada a la tapa, del mismo modo en la figura 29 se presenta el diseño obtenido para el nodo inalámbrico, que contiene la tarjeta PCB diseñada en la sección 3.3.10.1, sus dimensiones son de 9.1 cm por 7.4 cm por 6.8 cm y cuenta con 2 tapas, la superior permite aislar el circuito para reducir su manipulación y la inferior permite cambiar las baterías que son utilizadas. El proceso de elaboración de estas cajas supuso diferentes retos como lo fue el uso del software de diseño, así como la máquina de impresión 3D, debido a que al utilizarla el proceso de producción se vio interrumpido ya que la impresión de la caja se desajustaba de su sitio a causa de no hacer uso de un pegante especial para que esta se quedase fija en todo el proceso, por lo cual se optó por realizar la fabricación de forma externa. Con base en la investigación y selección realizada en la sección 3.3.2. se logró determinar que el sensor más adecuado para monitorear la temperatura y humedad ambiente es el DHT22, debido a las ventajas que en esta sección se resaltan, mientras que para el caso del suelo se seleccionó el sensor SHT31 debido también a su relación costo beneficio, así como a su resistencia a condiciones ambientales adversas. Por otro lado, en la sección 2.2.3.2 se realizó la selección de las mejores tecnologías de comunicación para sistemas IoT en agricultura, la cual arrojó que la tecnología ZigBee era la más adecuada por potencia, costo y versatilidad. La tarjeta elegida fue la Xbee3, la última versión del fabricante Digi, por lo que brinda mayor alcance a un menor consumo que sus antecesoras. Por último, la tarjeta de desarrollo elegida para el coordinador fue la ESP32, dadas sus diversas ventajas en la sección 3.3.5. Una vez instalado el sistema se evidenció que esta tarjeta realizaba de manera correcta la reconexión a la red WiFi sin necesidad de realizar ajustes adicionales.

6.3. Instalación en campo

La instalación del sistema se realizó en la finca el Salero II ubicada en la localidad de Usme en Bogotá, Colombia. Allí se encuentra un cultivo orgánico de fresa Albión, el cual ha recibido el apoyo de diversos proyectos a nivel nacional e internacional, tal y como se muestra en la figura 30 en donde se observa a las fundadoras y dueñas de la plantación junto a Ivanka Trump quien hizo una visita al lugar en el año 2019 en representación de la agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional USAID. Así mismo, en la figura 31 se presentan imágenes de los autores de este proyecto de grado en el lugar mencionado anteriormente, en compañía de la familia dueña del cultivo.

De igual manera, al remitirse a la figura 32 se puede evidenciar el montaje final del sistema, donde se observa el nodo central que fue ubicado en una repisa de madera asegurada a una pared en cercanías al enrutador WiFi, de modo que se obtenga una conexión estable a internet para hacer la comunicación y publicación de los datos, además de una conexión con un tomacorriente para alimentar el sistema, este quedó ubicado aproximadamente a 1.5 m del suelo, para de esta forma

facilitar la manipulación por parte del usuario final. Por otra parte, el nodo inalámbrico fue ubicado en medio del cultivo, también haciendo uso de una repisa que se ubicó aproximadamente a 0.5 m del suelo. Se extendió el sensor DHT22 un metro hacia arriba, siendo fijado con puntillas y amarres plásticos. Por otro lado, el SHT31 desciende aproximadamente 0.8 m para ubicarse por debajo de la tierra siendo introducido a una distancia aproximada de 0.3 m con respecto a la superficie del surco. Para garantizar la resistencia al agua y al polvo dadas las condiciones que supone un terreno agrícola, se realizaron las pruebas descritas en la sección 4.2.

Por otra parte, la separación de los dos dispositivos es de aproximadamente 50 m, distancia que garantiza una conexión estable y una reconexión de los módulos en el momento en que se cambian las baterías del sistema o existe algún tipo de interrupción tal y como se describió en la sección anterior, teniendo en cuenta esto y las dimensiones del cultivo en el cual se realizaron las pruebas se requieren de 7 nodos inalámbricos ubicados a una distancia aproximada de 50 m entre sí para cubrir toda la extensión de la plantación. En la figura 41 se observa el terreno de la finca encerrado en un recuadro rojo, el azul encierra la parcela donde se ubicó el nodo de medición con una estrella azul, mientras que la estrella roja simboliza la ubicación del nodo central. Por otro lado, el recuadro naranja encierra la extensión de cultivo que potencialmente podría llevar más nodos para cubrir esta finca por completo, estos se simbolizan con una estrella rosada.

Por último, el presupuesto total del proyecto se describe en la tabla 14, la cual incluye el tiempo de trabajo de los ingenieros, los componentes electrónicos utilizados, la fabricación de los circuitos impresos, las cajas de protección contra agua y polvo, las licencias de software utilizado, los equipos de laboratorio y los gastos de transporte de los implicados, teniendo un costo de \$53.970.000 COP para cubrir los gastos generales del proyecto. Sin embargo, el precio de cada uno de los dispositivos es de \$800.000 COP y de \$1.000.000 COP para el nodo inalámbrico y central respectivamente. Por lo que el costo de implementación para este cultivo, teniendo en cuenta el numero de nodos requeridos es de \$6.000.000 COP, valor con el cual se cubre los gastos de producción, generando retorno y ganancias sobre el proyecto.

6.4. Analítica en la nube

6.4.1. Descripción general

Las gráficas de resultados que se presentan en la sección 5.4. corresponden a las mediciones realizadas entre el medio día del 30 de octubre y 7 de noviembre del 2022, considerando el muestreo de datos presentado en la sección 3.7. se esperaba obtener una cantidad aproximada de 5760 mediciones correspondientes a 192 horas. Sin embargo, debido a factores tales como interferencia en la conexión WiFi, cambio irregular de las baterías y manipulación externa indebida, se obtuvo una cantidad de 3750 mediciones, con lo cual se presentó una pérdida de 2010 datos que corresponden a 67 horas distribuidas a lo largo del periodo de tiempo establecido. Teniendo en cuenta lo anterior, se eligieron rangos de tiempo específicos que permiten analizar la información adecuadamente de cada una de las secciones presentadas a continuación.

6.4.2. Tiempo real

En la sección 5.4.1. se observan las gráficas obtenidas a partir de los datos en tiempo real para las variables de temperatura y humedad del ambiente y suelo, estas corresponden a las mediciones hechas en la hora inmediatamente anterior a la captura de datos que fue realizada el día 01 de noviembre de 2022 a las 22:00. Se evidencia un comportamiento inverso entre las variables como era de esperarse, además de variaciones no mayores a 1.5 °C y 4 %RH que son acordes a un lapso de 1 hora.

6.4.3. Históricos

Los datos históricos presentados en la sección 5.4.2. pertenecen a las mediciones realizadas entre las 18:00 del 30 de octubre y las 13:00 del 02 de noviembre de 2022, rango que corresponde a 3 días y el cual es suficiente para presentar la información de forma clara sin necesidad de saturar la gráfica con un número mayor de mediciones que presentan un comportamiento periódico similar.

En primer lugar, la figura 36 muestra las variables ambientales que oscilan en un rango de 3.27 °C y 31.17 °C para la temperatura, mientras que para la humedad se encuentran entre 21.89 %RH y 96.39 %RH, donde al igual que en la sección anterior se observa un comportamiento inverso entre las variables. Por otra parte en la figura 37 se presentan las variables del suelo que oscilan en un rango de 10.82 °C y 20.60 °C para la temperatura, en cuanto a la humedad se encuentra en 92.02 %RH y 96.59 %RH, para este caso se observa que el comportamiento de las variables no es inverso, esto puede deberse a que en las horas que aumenta la humedad coincide en los momentos en que se activa el riego con lo cual la temperatura del suelo se mantiene estable, luego de un tiempo ambas variables disminuyen de forma similar hasta estabilizarse nuevamente.

6.4.4. Máximos y mínimos relativos

La sección 5.4.3. permite evidenciar las gráficas obtenidas de los máximos y mínimos relativos de cada una de las variables de interés en un periodo de tiempo de entre las 04:00 y 12:00 del 2 de noviembre de 2022, el cual resulta adecuado debido a la variación significativa que se da a lo largo de cada hora. En todas las figuras se muestran los valores máximos y mínimos, unidos mediante una línea verde y una roja respectivamente. Para el caso de las variables ambientales, en la figura 38 se puede observar que el comportamiento de la temperatura es ascendente a medida que transcurre el tiempo, con un valor aproximado mínimo de 6 °C y máximo de 14 °C, mientras que para el caso de la humedad se da un comportamiento inverso evidenciado en la figura 39, con un valor cercano mínimo de 75 %RH y máximo a 96 %RH. Por otra parte, para el caso de las variables del suelo se presenta una variación poco pronunciada para el caso de la temperatura, ya que tiene un valor aproximado mínimo de 12.2 °C y uno máximo de 13.5 °C como se muestra en la figura 40, mientras que para la humedad se tiene un valor mínimo cercano a 92.1 %RH y máximo de 92.3 %RH como se evidencia en la figura 41, lo cual se puede deber a los mecanismos de protección del cultivo tales como los invernaderos y los plásticos de recubrimiento sobre los surcos que permiten mantener estable las variables mencionadas.

6.4.5. Promedios por día

En la sección 5.4.4. se observan las gráficas obtenidas durante los días del 1 al 7 de noviembre de 2022, estas se pueden visualizar desde el *dashboard* del usuario con el objetivo de analizar los comportamientos de las variables ambientales durante todo el tiempo de medición. Cada día está representado por un color diferente, luego, la línea punteada para cada una de las figuras representa el promedio para todo este lapso. Para el caso de las temperaturas del suelo y del ambiente se puede ver la línea de promedio que tiene sus valores mínimos en horas de la noche y empieza a aumentar alrededor de la hora del amanecer. Para la humedad ambiental se observa un comportamiento inverso, la humedad es más baja alrededor del mediodía dado que la temperatura es más alta durante esta hora. Luego la humedad del suelo tiene un comportamiento distinto debido a que esta es altamente dependiente de la hora de riego del cultivo, por esto se ve como se empieza a incrementar el promedio alrededor de las 8:00 a 9:00 y se mantiene hasta las 17:00 debido a que durante estos períodos de tiempos se encuentra activo el suministro de agua. Por último, es importante resaltar que en estas gráficas se pueden observar de manera clara los períodos donde hubo una desconexión del sistema

con el servidor pues las gráficas al no encontrar datos trazan una línea recta hasta la siguiente medida que se realice, sin embargo, el promedio es realizado con los datos existentes en el canal.

6.4.6. *Tendencias*

La sección 5.4.5. evidencia las gráficas obtenidas de las tendencias de cada una de las variables en un periodo de tiempo de entre las 19:00 del 1 de noviembre de 2022 hasta las 01:00 del 2 de noviembre de 2022, para el caso del ambiente y entre las 21:00 del 1 de noviembre de 2022 hasta las 03:00 del 2 de noviembre de 2022 para el caso del suelo. Se realiza un suavizado de los datos (Media móvil) que se observa en una línea verde para luego hacer otra de tendencia que se observa de color negro. A partir de esta, se realizan las sugerencias de riego como se explica en la sección 3.7.6. y que se observan en la figura 50, esta tiene 3 posibilidades, cuando en la siguiente hora se presenten comportamientos debajo de los rangos de 12°C para la temperatura del suelo se muestra un cuadro azul que sugiere disminuir el riego, para los rangos entre 12°C y 25°C se presenta un cuadro verde que confirma que las variables se encuentran en estado normal y por último si se exceden los rangos de temperatura de 25°C se muestra un recuadro rojo sugiriendo aumentar el riego en estos casos. De la misma manera se ofrecen sugerencias para las variables del ambiente observadas en la figura 51, donde para temperaturas inferiores a 0°C se recomiendan mecanismos de protección, para temperaturas dentro de los rangos adecuados se muestra que está en estado normal y para temperaturas superiores a 30°C se sugiere el uso de mecanismos de enfriamiento.

6.4.7. *Ajuste para la humedad del suelo*

A partir de los resultados obtenidos en la sección 5.4.4. en la que se tienen los promedios de todas las variables en el rango de tiempo de medición, se observó que el sensor del suelo presentó una falencia ya que en la figura 45 se muestra que la humedad varía aproximadamente entre el 92 y 96.5 %RH sin un patrón de comportamiento claro, aun cuando se tiene un sistema de riego periódico. A diferencia de lo acontecido con las demás gráficas de esta misma sección, en las que todas las variables oscilan de manera similar a lo largo del tiempo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó que el sensor se encontraba muy cerca al punto de origen del agua dentro del surco insertado, razón por la que se obtuvo el comportamiento mencionado, con una humedad relativa muy alta. Fue necesario reubicar el sensor del suelo, insertándolo bajo las medidas explicadas en la sección 4.1. pero en esta ocasión en un lugar diferente al del punto de entrada del agua de las mangueras, resultando después de aproximadamente dos días de medición que la humedad del suelo varió en un rango esperado, ya que presentó una fluctuación aproximada entre 72.5 y 78 %RH. Por lo que, para obtener un comportamiento periódico como el mostrado en las demás variables ambientales, se requiere de mediciones a lo largo de aproximadamente 6 días adicionales.

6.5. Consumo del sistema

Para analizar el consumo de corriente de los dispositivos, es necesario considerar el cálculo teórico realizado en la sección 3.3.8. donde las tablas 10 y 11 permiten evidenciar que el consumo dado a partir de la hoja de datos de los componentes electrónicos para el nodo central es de 184 mA mientras que para el nodo inalámbrico es de 23.9 mA en modo inactivo y de 75.1 mA en activo, obteniendo una autonomía de aproximadamente 199 horas al hacer uso de las baterías seleccionadas en la sección 3.3.9. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó la medición de consumo de cada uno de los nodos en un ambiente controlado de laboratorio en el que se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 17, en donde se observa que el consumo de corriente para el nodo central es de 227.65 mA y para el nodo inalámbrico es de 25.49 mA en modo inactivo y de 79.18mA en activo, resultando así una autonomía esperada cercana a 186 horas como se muestra en la tabla 17.

Finalmente, una vez realizada la instalación del sistema y habiendo tenido un rango de medición de 8 días, se observó que la autonomía real de las baterías en campo es de aproximadamente 179 horas, tiempo en el cual fue necesario su reemplazo y recarga. Por lo anterior, se presenta un error relativo porcentual de 10.06 % con respecto al valor esperado teóricamente y de 3.76 % en comparación al estimado en las pruebas de laboratorio, lo cual, aunque son errores proporcionalmente pequeños, se pueden deber a factores tales como que el nodo inalámbrico no cuenta con un aislamiento térmico en su empaquetado, por lo que las bajas y altas temperaturas que experimentan las baterías provocan que se disminuyan más rápidamente. Así como la reconexión de los módulos Xbee cuando están ubicados en el cultivo, la cual provoca un pequeño aumento en el consumo, generando un impacto mayor en el suministro energético del dispositivo.

6.6. Página web

6.6.1. Principal

El apartado principal de la página web presenta la información general del proyecto, con lo cual todas las personas que tienen el enlace de esta pueden navegar en ella. En primer lugar, se tiene una pestaña de bienvenida como la que se observa en el costado izquierdo de la figura 53, en esta por medio de botones se puede elegir entrar al apartado de inicio de sesión y registro o explorar la página. Así mismo, en el costado derecho se tiene la sección acerca de, en la que se presenta la justificación del sistema propuesto. Seguidamente, tal y como se muestra en la figura 54 se tienen los apartados de servicios y galería, en los que se explica cómo funciona el dispositivo planteando sus principales ventajas y se presentan diversas imágenes referentes a los aspectos en los que genera valor. Así mismo, la figura 55 permite evidenciar la pestaña de impacto en la que se establece la relación del sistema con el sector social y el tecnológico. Finalmente, como se observa en la figura 56 la página presenta la información de los autores del proyecto y una sección pública de contacto, en la que las personas pueden enviar sus inquietudes por medio de un correo electrónico que llega al buzón de Smart Farm.

6.6.2. Registro e inicio de sesión

Se presenta una interfaz de gestión de usuarios amigable en la cual el agricultor puede crear su cuenta con ayuda de un correo electrónico, un nombre de usuario y contraseña como se puede observar en la figura 57. Una vez registrado él podrá acceder al dashboard que tendrá relacionado al dispositivo instalado en el cultivo. Cuando no tenga asociado ningún dispositivo se le informará que para disfrutar de todas las características deberá asociar un dispositivo Smart Farm.

El usuario podrá recuperar su contraseña por medio de un formulario como se puede observar en la figura 58 el cual enviará al correo registrado un enlace para restablecer la clave y que de esta manera no pierda el acceso a las funcionalidades. La creación de este formulario involucró una nueva base de datos con el identificador de cada usuario y su correspondiente llave, la cual es un código generado por un algoritmo de aleatoriedad, que permite que las claves no sean fáciles de replicar ni adivinar. Este enlace tiene una vigencia de un día o pierde también su validez si es utilizado por el usuario, para realizar esto fue necesaria la creación de un algoritmo el cual elimine esta llave de la base de datos y no permita cambiar la contraseña con esta, obligando al internauta a crear una nueva llave. Para realizar toda la gestión de usuarios se hizo uso de algoritmos de PHP y SQL tal como se describe en la sección 3.8.4. donde se creó una cuenta de correo, la cual envía de manera automática mensajes en formato HTML para que el usuario pueda recuperar su clave, esto implicó un reto en configuración y creación del algoritmo dado que se debe entender el protocolo SMTP, los puertos y características de seguridad necesarias, de otra forma no se enviarían los correos de manera correcta.

6.6.3. *Interfaz gráfica web*

Una vez los usuarios se han registrado en la página web se tienen dos opciones al ingresar, la primera mostrada en la figura 59 que se presenta cuando el usuario no tiene un sistema Smart Farm asociado con su cuenta, por lo que se le notifica esta situación por medio de cuadros de texto. La segunda opción mostrada en la figura 60 se da cuando el usuario que ha ingresado a la plataforma ya tiene la asociación del dispositivo a su cuenta, por lo que se presenta la información completa de la interfaz gráfica web, diseñada con el fin de que todo tipo de usuarios puedan utilizarla sin la necesidad de tener ningún conocimiento avanzado, es por esto que la página presenta un diseño que permite la navegación por medio de botones ilustrativos ubicados en la parte superior izquierda, los cuales redireccionan a las secciones de:

- ✓ *Home*: Se compone de 8 cuadros de gráficas que presentan la información de los sensores en tiempo real e históricos, además de los máximos y mínimos relativos.
- ✓ Análisis: Se presentan 10 cuadros de gráficas de la analítica de datos que consisten en promedios semanales, tendencias de estimación y sugerencia de riego.
- ✓ Información: Se encuentran 2 cuadros que permiten reproducir los videos explicativos del uso del sistema, tanto en el apartado local como web.
- ✓ Soporte: Se muestra un formulario en el que los usuarios pueden enviar sus inquietudes y conocer la información de contacto del proyecto tales como ubicación, correo y teléfono.

Por último, en todas las secciones descritas anteriormente se encuentran los botones de redes sociales mostrados en la parte superior de la figura 60, en donde las personas pueden visitar los diferentes canales de comunicación por medio de los cuales se presenta información relacionada con el proyecto y el sistema. Así mismo, al costado derecho de los botones de navegación de la interfaz se muestra la ubicación exacta del cultivo y en el costado opuesto de la página finalmente, el botón con el que se cierra sesión en la cuenta.

6.7. Riego

En la tabla 17 se observa el registro tomado por las personas en el cultivo que llevaron un control desde el día 23 de septiembre hasta el 25 de octubre de 2022, en las primeras 3 columnas se presenta la fecha y hora exacta de activación de riego, evidenciando que en esta finca se realiza en la mañana y en la tarde. Así mismo, en las dos columnas posteriores se registró la cantidad de agua en metros cúbicos por activación que eran utilizados para el área de cultivo donde el sistema Smart Farm fue instalado. Teniendo en cuenta estos datos, se determinó información importante que se presenta en la tabla 18 donde se muestra las horas promedio de activación que, para la mañana corresponde a las 9:05 y para la tarde a las 16:44 con un promedio de cantidad de agua por riego de 2 y 1.95 m³ respectivamente, con lo cual se tiene un riego diario de 3.95 m³. De igual manera, un aspecto de interés para el análisis realizado fue el de la frecuencia de activación en el sistema de riego, observando que en promedio pasan 7.38 horas entre el momento en que se hace el de la mañana y el efectuado en la tarde, mientras que, para el caso contrario, es decir, de tarde a mañana se tiene una duración aproximada de 16.21 horas.

Teniendo en cuenta lo anterior, es fundamental observar las gráficas de la sección 5.4.4. en la cual se presentan las mediciones de todas las variables con su promedio en los días que el sistema fue instalado, con lo cual se pueden establecer las acciones que se pueden tomar en el cultivo para mantener los rangos recomendados en la sección 2.2.2. Donde para obtener una temperatura media entre 18 y 25 °C, así como una humedad relativa promedio de 60 y 75 %RH en las horas del día se recomienda a partir de las figuras 42 y 43, realizar la activación del sistema de aspersión aérea a las 8:00, 11:00 y 14:00 aproximadamente, ya que en dichos horarios se presentan cambios abruptos. Por

otra parte, para el caso de las variables del suelo se pudo establecer que el sensor ubicado en campo presenta inconvenientes especialmente en la humedad como se explica en la sección 6.4.7., mientras que para el caso de la temperatura mostrada en la figura 44 si se presenta una variación esperada en función de los días y el riego, sin embargo, esta información no es suficiente para determinar una acción concreta en la cantidad de agua a suministrar en el cultivo.

Finalmente, al realizar la reubicación del sensor explicada en la sección 6.4.7., se evidencia que el patrón mostrado en la sección 5.5.4. presentó falencias por la ubicación del sensor y no por el diseño del sistema. Por lo que es posible concluir que, a partir de un análisis similar al realizado para el patrón de aspersión, pero con la nueva ubicación del sensor del suelo, se puede establecer una acción de riego que permita mantener los rangos recomendados en la sección 2.2.2.

7. Conclusiones

1. Se implementó un sistema de monitoreo IoT de variables de temperatura y humedad tanto del ambiente como del suelo, el cual puede ser replicado en función de las dimensiones de cualquier tipo de cultivo. Este, permite la configuración de los umbrales que generan las alertas y cuenta con una autonomía aproximada de 179 horas.
2. Se determinó que las tecnologías más adecuadas para un sistema de monitoreo modular replicable según el tamaño de un cultivo son; para la captura de las variables físicas, el sensor DHT22 así como el SHT31 para el ambiente y suelo respectivamente; para comunicación inalámbrica, Zigbee como protocolo de alto nivel mediante el uso de dispositivos Xbee 3; mientras que para el procesamiento de datos, el módulo ESP32 es la mejor elección.
3. Se realizó un prototipo compuesto por dos dispositivos electrónicos, uno de los cuales cuenta con protección de agua y polvo necesaria dada su ubicación dentro del cultivo, está hecho de ácido poliláctico con baja solubilidad en agua que es sugerido para protección ante este factor, lo cual fue evidenciado mediante ensayos de laboratorio de salpicadura y sumergimiento, mientras que el otro dispositivo no requiere de dicha seguridad puesto que fue diseñado para su uso en interiores, aunque está hecho del mismo material.
4. Se desarrolló una interfaz gráfica local y una web que brindan la posibilidad a los usuarios de conocer el estado actual, histórico y detallado de cada una de las variables de interés en su cultivo. Estas GUI son de fácil entendimiento ya que, para el caso local, se realizó una prueba de uso a 10 personas de diversas edades que no contaban con conocimiento previo, resultando que 9 de ellas no requirieron de una explicación detallada, así mismo para la versión web se tienen videotutoriales que permiten guiar a los usuarios en el manejo de estas.
5. Se estableció un patrón de aspersión a partir de los datos analizados en los 8 días que se registró la medición de las variables, en este se propone que se realice el rocío del cultivo 3 veces al día a partir de las 8:00 con una diferencia de 3 horas, periodo de tiempo en el que se estimó un comportamiento crítico en este cultivo.
6. Se evidenció que no fue posible realizar el patrón de riego en los surcos de la plantación, debido a la falta de un comportamiento periódico en la humedad del suelo, el cual no fue obtenido debido a una incorrecta ubicación del sensor. Sin embargo, al corregirse se mostró que se requiere de un análisis similar que para el caso ambiental para así estimar una sugerencia de riego promedio.

8. Trabajo futuro

Durante el desarrollo del presente trabajo de grado se identificaron aspectos importantes que vale la pena complementar para mejorar el resultado final obtenido. En principio, se debe ajustar el desarrollo de software realizado para el nodo inalámbrico, de forma que se pueda hacer la lectura de los sensores implementados sin la necesidad de incluir las librerías utilizadas. Además, con el propósito de brindar más información de las mediciones realizadas, implementar una analítica de datos que incluya algoritmos de inteligencia artificial, de modo que se puedan gestionar y analizar un alto volumen de datos utilizando procesos matemáticos para predecir eventos o resultados futuros. Por otro lado, es posible complementar la interfaz gráfica de usuario, incluyendo información adicional a las mediciones en tiempo real y los datos históricos del sistema, así mismo realizar un ajuste en el software del nodo central de forma que sea posible enviar los datos almacenados en la memoria que no hayan sido enviados previamente a internet debido a una pérdida en la conexión a internet. Así mismo, agregar la funcionalidad de que el usuario pueda controlar las alertas desde la página web, para activarlas o desactivarlas mediante botones. Por otra parte, obtener una certificación de protección IP del empaquetado diseñado para el nodo inalámbrico y ajustar la ubicación para el sensor del suelo. Por último, se puede establecer una conexión entre la analítica de datos y un sistema de riego automático, con el objetivo de optimizar el recurso hídrico de los cultivos.

9. Referencias

- [1] De Clercq, M., Vats, A., & Biel, A. Agriculture 4.0: The future of farming technology. Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE, 11-13, 2018.
- [2] United Nations Environment Programme. Food Waste Index Report. Nairobi, 2021.
- [3] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Estrategia transversal: VII. Transformación del campo", Bogotá D.C., 2017.
- [4] Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina CODS. "Los retos de la agricultura colombiana frente al cambio climático", 2021.
- [5] Departamento Nacional de Planeación, "Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia", Bogotá D.C., 2016.
- [6] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Cadena de las hortalizas", Bogotá D.C., 2020.
- [7] Instituto Colombiano Agropecuario, "Manejo Fitosanitario del Cultivo de Hortalizas", Bogotá D.C., 2012.
- [8] J. M. Núñez V, F. Fonthal R and Y. M. Quezada L, "Design and Implementation of WSN and IoT for Precision Agriculture in Tomato Crops," 2018 IEEE ANDESCON, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564674.
- [9] Amit KumerPodder, Abdullah AlBukhari. "IoT based smart agrotech system for verification of Urban farming parameters", 2021.
- [10] T. Wiangtong and P. Sirisuk, "IoT-based Versatile Platform for Precision Farming," 2018 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2018, pp. 438-441, doi: 10.1109/ISCIT.2018.8587989.
- [11] E. Nurellari and S. Srivastava, "A Practical Implementation of an Agriculture Field Monitoring Using Wireless Sensor Networks and IoT Enabled," 2018 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES) (Formerly iNiS), 2018, pp. 134-139, doi: 10.1109/iSES.2018.00037.
- [12] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, "Cadena de las hortalizas", Bogotá D.C., 2020.
- [13] Instituto Colombiano Agropecuario, "Manejo Fitosanitario del Cultivo de Hortalizas", Bogotá D.C., 2012.

- [14] Vera, A. M., Venegas, A. M., Pertuz-Cruz, S. L., & Ángulo, R. "Análisis de los factores medio ambientales condicionantes de la inocuidad de hortalizas cultivadas y consumidos en el área rural de Tenjo, Cundinamarca". Revista de la Facultad de Medicina UNAL, 2015. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v63n1.41098>
- [15] Navarro, G. M. "Manejo del Estrés por Temperatura en Cultivos Hortícolas". Curso de capacitación Intagri. Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura. Diciembre, 2014.
- [16] "El Cultivo protegido en clima mediterráneo: Roma". Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002.
- [17] Sanz, J., Uribarri, A., Daba, S., Aguado, G. and Del Castillo, J. "Guía de cultivo de lechuga y cogollo en invernadero". Invernaderos - Navarra Agraria, 133, 2002.
- [18] Plants, W. Strawberry Albion: "Descripción de la variedad fresa Albión". Madrid, España. 2020.
- [19] Programa de apoyo agrícola y agroindustrial vicepresidencia de fortalecimiento empresarial cámara de comercio de Bogotá, "Manual Fresa", Bogotá D.C.,2015.
- [20] Tovar. J, Santos. J, Badillo. A, Rodríguez. G, "Internet of things applied to agriculture: actual state," 2019, Universidad Católica, doi: 10.21501/21454086.3253.
- [21] F. J., Ávila-Camacho, L. M. Moreno-Villalba. "Internet de las Cosas (IoT) Retos para las Empresas en la era de la Industria 4.0". Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 2022.
- [22] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour and E. -H. M. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk," in IEEE Access, vol. 7, pp. 129551-129583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932609.
- [23] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikuhi, C. Y. Leow and M. N. Hindia, "An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 5, pp. 3758-3773, Oct. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2844296.
- [24] Wen Tao, Liang Zhao, Guangwen Wang, Ruobing Liang, "Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges", Computers and Electronics in Agriculture, Volume 189, 2021, 106352, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106352>.
- [25] V. -L. Nguyen, P. -C. Lin and R. -H. Hwang, "Energy Depletion Attacks in Low Power Wireless Networks," in IEEE Access, vol. 7, pp. 51915-51932, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911424.
- [26] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikuhi, C. Y. Leow and M. N. Hindia, "An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 5, pp. 3758-3773, Oct. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2844296.
- [27] Feng, X., Yan, F. & Liu, X. "Study of Wireless Communication Technologies on Internet of Things for Precision Agriculture". Wireless Pers Commun 108, 1785–1802 (2019). <https://doi.org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.1007/s11277-019-06496-7>
- [28] Mustapha Reda Senouci, Abdelhamid Mellouk, 1 - Wireless Sensor Networks, Editor(s): Mustapha Reda Senouci, Abdelhamid Mellouk, Deploying Wireless Sensor Networks, Elsevier, 2016, Pages 1-19, ISBN 9781785480997,<https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-099-7.500015>.
- [29] Daozong Sun, Weixing Wang, Jianqing Lu and Zuanhui Lin, "Design of WSN nodes and network performance analysis in a tea plantation," IET International Conference on Wireless Sensor Network 2010 (IET-WSN 2010), 2010, pp. 144-147, doi: 10.1049/cp.2010.1043.
- [30] M. S. Mekala and P. Viswanathan, "A Survey: Smart agriculture IoT with cloud computing," 2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS), 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICMDCS.2017.8211551.
- [31] Tovar. J, Santos. J, Badillo. A, Rodríguez. G, "Internet of things applied to agriculture: actual state," 2019, Universidad Católica, doi: 10.21501/21454086.3253

- [32] Wen Tao, Liang Zhao, Guangwen Wang, Ruobing Liang, "Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges, Computers and Electronics in Agriculture", Volume 189, 2021, 106352, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106352>.
- [33] M. S. Mekala and P. Viswanathan, "A Survey: Smart agriculture IoT with cloud computing," 2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS), 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICMDCS.2017.8211551.
- [34] IEC 60529. "Estándar internacional de protección (IEC 60529): Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP)". Edición 2:1989 consolidada con la modificación 1:1999. 2001-2.
- [35] S.F, Sparkfun, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)", 2015, pp. 1-10.
- [36] S, Sensirion, "Digital humidity and temperature sensor SHT31", 2018, pp. 1-5.
- [37] Strait, G, Link Labs. ZigBee Vs. XBee: "An Easy-To-Understand Comparison". Annapolis, MD 21401, EE. UU, 2016.
- [38] Digi, "Digi xbee 3 zigbee 3 RF module", Zigbee 3 RF Module, 2022.
- [39] Copa-data, "¿Qué significa hmi? Interfaz Humano-Máquina: ;" 2022.
- [40] LithiumBatteryChina, "Los Pros y los contras de las baterías de iones de litio vs las baterías de hidruro metálico de níquel", 2021.
- [41] AWS, Amazon. "¿Qué es el alojamiento web?", 2021.
- [42] Webolto. "Guía comparativa para elegir hosting o alojamiento web", 2019.
- [43] Proain, tecnología agrícola. "Producción de fresa, requerimientos de clima y suelo", 2020.
- [44] GlobeArgentina. "Protocolo de humedad y temperatura del suelo empleando la estación Davis", 2005.
- [45] Acdivoca. Ampliando Oportunidades en el Mundo. "Ivanka Trump conoció a mujeres empoderadas por Acdi/voca". 2019.

10. Anexos

- 10.1. Protocolo de pruebas.
- 10.2. Código del nodo coordinador
- 10.3. Código nodo inalámbrico
- 10.4. Algoritmos de Analítica descriptiva
- 10.5. GUI Local
- 10.6. Códigos Página Web