

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Tema:

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES AGRÍCOLAS EMPLEANDO LOS PRINCIPIOS DE SMART FARMING Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación, presentado previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

ÁREA: Electrónica

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Tecnologías de la información y Sistemas de control

AUTOR: Henry Paul Chato Guangasi

TUTOR: Ing. Edgar Patricio Córdova Córdova, Mg.

Ambato - Ecuador

febrero - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del trabajo de titulación con el tema: SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES AGRÍCOLAS EMPLEANDO LOS PRINCIPIOS DE SMART FARMING Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN, desarrollado bajo la modalidad Proyecto de Investigación por el señor Henry Paul Chato Guangasi, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Técnica de Ambato, me permito indicar que el estudiante ha sido tutorado durante todo el desarrollo del trabajo hasta su conclusión, de acuerdo a lo dispuesto en el Artículo 17 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.3 del instructivo del reglamento referido.

Ambato, febrero 2025.



Ing. Edgar Patricio Córdova Córdova, Mg.

TUTOR

AUTORÍA

El presente trabajo de titulación con el tema: SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES AGRÍCOLAS EMPLEANDO LOS PRINCIPIOS DE SMART FARMING Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN es absolutamente original, auténtico y personal y ha observado los preceptos establecidos en la Disposición General Quinta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, febrero 2025.



Henry Paul Chato Guangasi

C.C. 1804625950

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que reproduzca total o parcialmente este trabajo de titulación dentro de las regulaciones legales e institucionales correspondientes. Además, cedo todos mis derechos de autor a favor de la institución con el propósito de su difusión pública, por lo tanto, autorizo su publicación en el repositorio virtual institucional como un documento disponible para la lectura y uso con fines académicos e investigativos de acuerdo con la Disposición General Cuarta del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, febrero 2025.



Henry Paul Chato Guangasi

C.C. 1804625950

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de par calificador del informe final del trabajo de titulación presentado por el señor Henry Paul Chato Guangasi, estudiante de la Carrera de Telecomunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, bajo la Modalidad Proyecto de Investigación, titulado SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES AGRÍCOLAS EMPLEANDO LOS PRINCIPIOS DE SMART FARMING Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN, nos permitimos informar que el trabajo ha sido revisado y calificado de acuerdo al Artículo 19 del Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato y el numeral 6.4 del instructivo del reglamento referido. Para cuya constancia suscribimos, conjuntamente con el señor Presidente del Tribunal.

Ambato, febrero 2025.



Firmado electrónicamente por:
FRANKLIN OSWALDO
MAYORGA MAYORGA

Ing. Franklin Oswaldo Mayorga Mayorga Mg.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
VICTOR SANTIAGO
MANZANO VILLAFUERTE

Ing. Víctor Santiago Manzano Villafuerte Mg.
PROFESOR CALIFICADOR



Firmado electrónicamente por:
JESUS ISRAEL GUAMAN
MOLINA

Ing. Jesús Israel Guaman Molina Mg.
PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante, por darme fortaleza y sabiduría en cada paso de este camino.

A mis amados padres, Ignacio y Rosario, por su amor incondicional, su apoyo y sus sacrificios que han sido fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por creer en mí y por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo y dedicación.

A mis hermanas, por su comprensión y motivación constante, incluso en los momentos más difíciles.

Y, finalmente, a mis amigos, quienes con sus palabras de aliento y compañía hicieron que este viaje fuese más llevadero y lleno de gratas experiencias.

Este logro es el resultado del apoyo y amor de cada uno de ustedes.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la salud, la fortaleza y la claridad para completar esta etapa de mi vida.

A mis padres, cuyo amor, apoyo incondicional y confianza en mis capacidades han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro. Gracias por ser mi mayor fuente de motivación y ejemplo de esfuerzo.

A mis hermanas, por su paciencia y comprensión durante todo este proceso, así como por su constante ánimo en los momentos de dificultad.

A mi tutor de tesis, Ing. Edgar Patricio Córdova, por su guía, sus valiosas sugerencias y su tiempo dedicado a este proyecto. Su compromiso y conocimiento han sido claves para el desarrollo de esta investigación.

A los docentes de la FISEI, por transmitir su experiencia y enseñanzas que no solo enriquecieron mi formación académica, sino también mi perspectiva profesional y personal.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra forma, formaron parte de este recorrido. A todos ustedes, gracias por ser parte de este importante logro en mi vida.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA ..... **i**

APROBACIÓN DEL TUTOR ..... **ii**

AUTORÍA ..... **iii**

DERECHOS DE AUTOR ..... **iv**

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO ..... **v**

DEDICATORIA ..... **vi**

AGRADECIMIENTO ..... **vii**

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS ..... **viii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xi**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**

ÍNDICE DE ANEXOS ..... **xviii**

RESUMEN EJECUTIVO ..... **xix**

ABSTRACT ..... **xx**

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO **1**

1.1 Tema de investigación 1

1.1.1 Planteamiento del problema 1

1.2 Antecedentes investigativos 2

1.3 Fundamentación teórica 4

1.3.1 Agricultura tradicional 4

1.3.2 Agricultura en ambientes controlados 5

1.3.3 Cultivo de plantas medicinales 6

1.3.4 Agricultura de precisión 8

1.3.5 Smart Farming 9

1.3.6 Sistemas IoT 9

1.3.7 Arquitecturas IoT aplicados a los sistemas agrícolas 18

1.3.8 Comunicación inalámbrica utilizadas en la agricultura 19

1.3.9 Tecnología LoRa 20

1.3.10 Tecnología LoRaWAN 20

1.3.11 Caracterización del suelo 21

1.3.12 Hardware y Software 23

1.4 Objetivos 29

1.4.1 Objetivo general 29

1.4.2 Objetivos específicos 29

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA 30

2.1 Materiales 30

2.2 Métodos 31

2.2.1 Modalidad de la investigación 31

2.2.2 Recolección de información..... 31

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos 32

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 33

3.1 Desarrollo de la propuesta..... 33

3.1.1 Análisis del invernadero..... 33

3.1.2 Requerimientos del sistema..... 34

3.1.3 Arquitectura del sistema..... 35

3.1.4 Selección de materiales y equipos..... 36

3.1.5 Arquitectura funcional del sistema..... 37

3.1.6 Configuración Protocolo LoRaWAN..... 38

3.1.7 Configuración de servidor..... 46

3.1.8 Implementación de la Etapa de Monitoreo y Control 59

3.1.9 Costos 76

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 80

4.1 Conclusiones 80

4.2 Recomendaciones..... 82

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 83

ANEXOS..... 92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tecnologias aplicadas a la agricultura 8

Tabla 2. Arquitecturas IoT Aplicados a la Agricultura 19

Tabla 3. Características de las tecnologías inalámbricas usadas en la agricultura 20

Tabla 4. Tabla comparativa de módulos LoRa. 24

Tabla 5. Tabla comparativa de sensores de suelo. 25

Tabla 6. Tabla comparativa de sensores de ambiente. 26

Tabla 7. Tabla comparativa de microordenadores. 26

Tabla 8. Tabla comparativa del Gateway. 27

Tabla 9. Tabla comparativa entre Dashboards. 28

Tabla 10. Tabla comparativa entre bases de datos. 28

Tabla 11. Hardware usado 30

Tabla 12. Software usado 30

Tabla 13. Recurso de información 32

Tabla 14. Hardware para el desarrollo del sistema electrónico 34

Tabla 15. Software para el sistema 34

Tabla 16. Confiabilidad de humedad 71

Tabla 17. Confiablidad de PH 72

Tabla 18. Confiabilidad de conductividad 73

Tabla 19. Confiabilidad Temperatura 74

Tabla 20. Confiabilidad de Humedad Relativa 75

Tabla 21. Presupuesto nodo sensores..... 77

Tabla 22. Presupuesto nodo actuadores, gateway y servidor..... 77

Tabla 23. Presupuesto para el tablero de control 78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Uso de tractores en la agricultura tradicional 5

Figura 2. Cultivos en ambientes controlados 5

Figura 3. Arquitectura de un dispositivo de medición IoT 10

Figura 4. Características de dispositivos IoT 11

Figura 5. Categorías del IoT aplicado a la agricultura 11

Figura 6 . Arquitectura básica de 3 capas 13

Figura 7. Arquitectura de sincronización de reloj 13

Figura 8. Arquitectura biométrica descentralizada de 3 capas 14

Figura 9. Arquitectura IoT basado en NFV 15

Figura 10. Arquitectura de 5 capas 16

Figura 11. Modelo de referencia ITU Y.400/Y.2060 16

Figura 12. a) Capacidades de dispositivos, b) Capacidad de Gateway 17

Figura 13. Capacidades de la capa de Red del modelo ITU Y.4000/2060 17

Figura 14. Capacidades de Gestión y Seguridad del modelo ITU Y.4000/2060 18

Figura 15. Arquitectura red LoRaWAN..... 21

Figura 16. Muestreo en cuadrícula 22

Figura 17. Muestreo en Zigzag 22

Figura 18. Muestreo en X 22

Figura 19. Muestreo aleatorio simple 23

Figura 20. Muestreo aleatorio estratificado 23

Figura 21. Arquitectura del sistema 35

Figura 22. Arquitectura funcional del sistema 38

Figura 23. Interfaz Gateway HT-M02 39

Figura 24. Tráfico de datos en el Gateway 39

Figura 25. Registro del Gateway..... 40

Figura 26. Estado del Gateway 40

Figura 27. Creación de organización 41

Figura 28. a) Registro de dispositivos, b) Dispositivos registrados..... 42

Figura 29. Método de activación OTAA colocada en cada microcontrolador. 43

Figura 30. Empaquetado de datos 43

Figura 31. Gestión de comunicacion LoRaWAN 43

Figura 32. Función para recibir datos del servidor 44

Figura 33. Diagrama de flujo de la comunicación del microcontrolador con el servidor LoRaWAN 44

Figura 34. Librerias de sensrores 45

Figura 35. Función para leer sensor de suelo..... 45

Figura 36. Servidor MQTT 46

Figura 37. servidor MQTT en Node-Red..... 46

Figura 38. Nodo mosquito MQTT IN (Node-Red)..... 47

Figura 39. Configuración nodo switch..... 47

Figura 40. Funciones a la salida del switch..... 48

Figura 41. Código de extracción de variables medidas 48
Figura 42. Configuración nodo join 49
Figura 43. Código para extraer los valores agrupados 49
Figura 44. Nodo join para agrupar los promedios 50
Figura 45. Código para procesar los datos y generar downlinks 51
Figura 46. Configuración del nodo MQTT OUT 51
Figura 47. Nodo InfluxDB OUT 52
Figura 48. Programación gráfica final en Node-Red 52
Figura 49. Bucket en InfluxDB 53
Figura 50. a) Valores medidos, b) query Builder 53
Figura 51. Esquema general de la base de datos 54
Figura 52. Data source Influxdb en Grafana 54
Figura 53. Valor en tiempo real en Grafana 55
Figura 54. Nombre y condición de la alerta 56
Figura 55. Comportamiento de evaluación 56
Figura 56. Configuración de envío de notificaciones 57
Figura 57. Creación de bot 57
Figura 58. Creación de Contact Point 58
Figura 59. Alertas de umbral alto/bajo 58
Figura 60. Alerta por perder conexión con nodos 59
Figura 61. Heltec LoRa32 59

Figura 62. Modulo TTL a RS485 60

Figura 63. Circuito de acondicionamiento para el DHT11 60

Figura 64. Módulo relé 8 canales y Bloque de terminales 61

Figura 65. Selectores para control manual 61

Figura 66. Circuito del nodo sensor 62

Figura 67. PCB del nodo sensor 63

Figura 68. Circuito nodo actuador 63

Figura 69. Circuito nodo actuador 64

Figura 70. Proceso de transferencia térmica finalizado 64

Figura 71. Baquelita finalizado proceso de ácido 64

Figura 72. Baqulitas con componentes soldados 65

Figura 73. Tablero de control 66

Figura 74. Conexión de electroválvulas 66

Figura 75. a) Nodo sensor, b) Sensor de suelo 67

Figura 76. Nodos sensores colocados en el invernadero 67

Figura 77. Gauges para visualización en tiempo real 68

Figura 78. Gráfica en series de tiempo 68

Figura 79. Tiempo del navegador local 68

Figura 80. Descarga de datos históricos en formato xlsx 69

Figura 81. Datos históricos en excel 69

Figura 82. Interfaz gráfica de las mediciones 70

Figura 83. Sensor soil survey instrument 70

Figura 84. Confiabilidad de humedad 72

Figura 85. Confiabilidad de PH 73

Figura 86. Confiabilidad de conductividad 74

Figura 87. Confiabilidad de Temperatura 75

Figura 88. Confiabilidad Humedad Relativa 76

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Plan Nacional de Frecuencias 92

Anexo B. Descripción técnica del microcontrolador Heltec LoRa32 93

Anexo C. Especificaciones técnicas del sensor de suelo 94

Figura C1. Especificaciones técnicas sensor de suelo 94

Anexo D. Especificaciones técnicas del Gateway HT-M02 95

Anexo E. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 4B 96

Anexo F. Código de los nodos sensores 97

Anexo G. Código del nodo actuador 100

RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad, la agricultura forma parte de un papel fundamental para la sociedad. Aunque en la mayoría de los casos se lo desarrolla de la manera tradicional que es al aire libre, los cultivos bajo ambientes controlados como invernaderos han venido en aumento puesto que de esta manera se protege a las plantaciones de cambios climáticos abruptos. Además, se han venido integrando herramientas de tecnologías avanzadas para tener un mayor control del suelo donde se encuentran las plantaciones, conocidas como Agricultura de Precisión.

En este contexto, se realizó un estudio teniendo como objetivo primordial la implementación de un sistema que permita controlar y monitorear variables agrícolas empleando principios de Agricultura de Precisión y Smart Farming. Es de vital importancia tener un suelo apto para cosecha si se quiere tener una mayor producción y que sea de calidad. Este sistema se fundamenta en el uso de la tecnología LoRaWAN, que tiene la capacidad para gestionar varios nodos sin que exista pérdida de información.

El sistema consta de 4 etapas: adquisición de datos, transmisión, control y procesamiento y visualización. La etapa de adquisición consta de sensores para adquirir datos del suelo y del ambiente dentro del invernadero, el sistema de adquisición de datos demostró una confiabilidad del 98,1%. En la etapa de transmisión se empleó la tecnología LoRaWAN usando microcontroladores Heltec LoRa32 y un Gateway encargado de receptar los datos de todos los nodos. Para el procesamiento y visualización se diseñó una interfaz gráfica donde se observa la representación visual de las variables medidas mediante gráficas en series de tiempo. En la etapa de control se evidenció que los actuadores tenían una alta efectividad activándose y desactivándose en los momentos adecuados.

Palabras clave: Agricultura de precisión, Smart farming, LoRaWAN, invernaderos, adquisición de datos, control.

ABSTRACT

In contemporary society, agriculture plays a pivotal role. Although it is predominantly cultivated in the conventional manner, which is outdoors, there has been a notable increase in the cultivation of crops in controlled environments, such as greenhouses. This shift is driven by the need to safeguard plantations from the adverse effects of abrupt climate changes. Moreover, the integration of advanced technology tools has enabled enhanced control over the soil in which the plantations are situated, a practice known as precision agriculture.

In this context, a study was conducted with the primary objective of implementing a system to control and monitor agricultural variables using Precision Agriculture and Smart Farming principles. It is imperative to have soil conducive to successful harvesting, as this is directly linked to achieving higher production and quality. The system is founded on the implementation of LoRaWAN technology, a system capable of managing multiple nodes with a high degree of reliability and without the loss of any information.

The system is comprised of four distinct stages: data acquisition, transmission, control and processing, and visualization. The acquisition stage involves the use of sensors to gather data from the soil and the environment within the greenhouse, with a demonstrated reliability of 98.1%.The transmission stage employs LoRaWAN technology, utilizing Heltec LoRa32 microcontrollers and a gateway that functions as a central receiver for data from all nodes. The processing and visualization stage employs a dedicated graphical interface, facilitating the observation of measured variables through time-series graphs. In the control stage, the actuators demonstrated high efficiency, responding promptly and accurately to the programmed instructions.

Keywords: Precision farming, Smart farming, LoRaWAN, greenhouses, data acquisition, control.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Tema de investigación

SISTEMA ELECTRÓNICO PARA EL MONITOREO Y CONTROL DE VARIABLES AGRÍCOLAS EMPLEANDO LOS PRINCIPIOS DE SMART FARMING Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

1.1.1 Planteamiento del problema

El cambio climático es una amenaza para la actividad agrícola. El ciclo productivo de los cultivos es afectado directamente por cambios en el patrón de lluvia y aumento de la temperatura que tiene como consecuencia mayor evapotranspiración, cambios graduales de los niveles de humedad y aridez y cambios en el comportamiento de plagas y enfermedades. El impacto que produce alguna de estas amenazas climáticas depende de la vulnerabilidad de la producción y de los productores, a lo cual contribuye su situación socioeconómica, los insumos y las tecnologías utilizadas, la disponibilidad de agua, la fertilidad del suelo y el nivel de organización.[1]

El uso eficiente del recurso hídrico en la agricultura es crucial para sostener la producción agropecuaria en un contexto de creciente demanda y condiciones ambientales cambiantes. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en Ecuador hay $2.2x10^6$ ha que se utilizan para explotación agrícola, de las cuales cerca de $1.5x10^6$ ha están bajo algún tipo de riego. Sin embargo, algunos de los sistemas de riego son poco eficientes y resultan en baja eficiencia en el uso del agua (inclusive <50%), erosión del suelo y perdidas de los componentes de fertilidad de los sistemas productivos.[2]

La provincia del Azuay cuenta con un 44,9% de su suelo clasificado como de alta fertilidad. Sin embargo, un 37,29% de los suelos tiene una fertilidad media y un 9,5% presenta una fertilidad baja, ubicándose estos últimos en sectores sensibles como páramos o áreas desérticas, donde se recomienda evitar el cultivo debido a los malos resultados y pérdidas económicas esperadas. La falta de conocimiento y capacitación

adecuada entre los agricultores limita su capacidad para maximizar la productividad agrícola.[3]

El uso excesivo de recursos en los invernaderos como fertilizantes y agua, provocan una degradación del suelo haciendo que esta no pueda retener nutrientes. Esta degradación afecta de manera negativa al crecimiento de los cultivos debido a que no pueden absorber los nutrientes y agua de manera adecuada, dando como resultado una productividad reducida.

La gestión inadecuada de las condiciones ambientales dentro del invernadero, como el control de pH, conductividad, humedad, temperatura y ventilación crean condiciones favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades. Por lo que puede existir problemas de calidad ya que debilitan a la planta haciendo que la producción se reduzca significativamente.

La falta de capacitación y conocimiento apropiado del personal agrícola dan como consecuencia una respuesta ineficaz frente a cambios abruptos en el entorno y suelo dentro de los invernaderos. Esto deriva a que los agricultores no puedan controlar adecuadamente las plagas o la degradación del suelo lo cual agrava los problemas existentes contribuyendo a un bajo rendimiento de producción de los cultivos.

1.2 Antecedentes investigativos

A continuación, como antecedentes investigativos se toma en cuenta tres proyectos de investigación y dos artículos científicos referentes a la agricultura de precisión y Smart Farming aplicando comunicación inalámbrica y gestores de información. Se tomó en consideración documentación reciente y relevante.

En el año 2021, en Colombia, Arregoces P., Restrepo J., Usme M., Montoya J., Branch J., presentaron el tema de investigación “MONITOREO DE CULTIVOS BAJO INVERNADERO UTILIZANDO TECNOLOGÍAS 4.0”, el sistema que constan de una red de sensores, microcontrolador, tarjeta expansora y la antena para la comunicación inalámbrica, la cual utiliza una placa de desarrollo LoPy4 la misma que ofrece una conexión con LoRa, Sigfox, Wifi y Bluetooth. También se utiliza la antena para LoRaWAN con receptor IPEX a SMA de 915 MHz. El sistema de sensores tiene

como objetivo recopilar los parámetros del entorno de humedad relativa, temperatura, luz visible, luz infrarroja y luz ultravioleta. Con la topología de arquitectura establecida se comenzaron a recibir 72 datos al día por sensor, por lo cual se recopilan alrededor de 30000 datos al mes. Los resultados mostraron que la temperatura osciló entre 10 °C y 35 °C. La humedad relativa varió entre 30 % y 97 %, alcanzando picos en la madrugada, afectando la polinización del tomate y favoreciendo enfermedades en otros cultivos. El espectro visible e infrarrojo fluctuó según la exposición solar, mientras que los niveles de radiación UV presentaron valores atípicos que sugieren fallos en el sensor o la transmisión.[4]

En el año 2022, en Bogotá, Colombia, Peña D., Fajardo S., Galindo D., en su investigación con el tema "AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y SISTEMAS BASADOS EN IOT: CASO DE ESTUDIO CANNABIS MEDICINAL" de tipo experimental diseñan un prototipo de un sistema IoT (Internet de las Cosas) para apoyar el control de las variables ambientales esenciales en los cultivos de cannabis. El sistema diseñado permite la conexión de hasta 10 dispositivos, cada uno monitoreando hasta 10 variables diferentes, ofreciendo una capacidad de ingesta de datos de hasta 4,000 datos y extracción de hasta 500,000 datos por día, con soporte para una tasa de datos de una petición por segundo. Los datos son retenidos por un mes, permitiendo un seguimiento a corto plazo, y se visualizan a través de 3 tableros de control con hasta 10 widgets cada uno. Es compatible con protocolos HTTP, MQTT, TCP y UDP, y permite notificaciones mediante SMS, llamadas de voz, correo electrónico, WebHook y Slack.[5]

En el año 2023, en Ambato, Ecuador, Freddy Pérez desarrolla el tema "SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL Y MONITOREO BASADO EN TECNOLOGÍA LORAWAN Y MQTT PARA EL CULTIVO DE HORTALIZAS BAJO INVERNADERO" desarrolla un sistema que monitorea variables como temperatura, humedad, pH y luminosidad en un cultivo de pimiento en invernadero, utilizando tecnologías LoRaWAN y MQTT. El sistema utiliza una arquitectura maestro-esclavo, con nodos finales que recolectan datos a través de sensores y los envían a un servidor mediante un Gateway LoRaWAN. Los nodos, basados en microcontroladores ESP32 con módulos LoRa de 868/915 MHz, permiten la comunicación bidireccional a largas distancias.[6]

En el año 2023, en Loja, Ecuador, Montaño M., Gonzales J., Jiménez O., Mingo L., Carrión C., presentan el tema "DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS", el estudio se enfoca en la implementación de un sistema IoT en un cultivo hidropónico de lechugas. Este sistema tiene como objetivo proporcionar monitoreo preciso de variables ambientales clave para optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas y mejorar la producción agrícola. El sistema IoT implementado permite monitorear temperatura y humedad ambiental en intervalos de 10 minutos, generando un total de aproximadamente 144 muestras diarias durante un período de 5 meses.[7]

En el año 2024, en Cuenca, Ecuador, Bryan Peñaranda plantea el tema "DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE VARIABLES EN UN HUERTO AGRÍCOLA" en el cual desarrolla un dispositivo de medición capaz de monitorear la temperatura, radiación UV y humedad del suelo. Utilizando tecnologías avanzadas, el sistema proporciona información precisa y en tiempo real, lo que facilita una toma de decisiones informada. Utilizó tecnología LoRa a 915MHz para la comunicación entre el dispositivo transmisor y receptor, permitiendo una cobertura amplia de transmisión y bajo consumo de energía, aspectos cruciales en entornos agrícolas.[8]

1.3 Fundamentación teórica

Con el pasar del tiempo la agricultura ha ido evolucionando constantemente, tal es el caso que no solo se realiza de la forma tradicional (al aire libre), sino que también se lo ha venido realizando en ambientes controlados (invernaderos). Por tal motivo se realizará un análisis de cada uno de ellos.

1.3.1 Agricultura tradicional

Esta actividad se ha ido perfeccionando constantemente y en el presente tiene una cierta complejidad, como la creación de surcos y fertilización con tractores, como se muestra en la Figura 1. Sin embargo, al desarrollarse de la manera tradicional, esta presenta ciertas desventajas como un menor acceso al agua de regadío y exposición

directa a las heladas, además, los suelos dedicados a la agricultura cada vez van disminuyendo, ya sea por el deterioro de estos o por una constante urbanización.[9]



Figura 1. Uso de tractores en la agricultura tradicional

1.3.2 Agricultura en ambientes controlados

Esta práctica agrícola está siendo cada vez más usada tanto a nivel mundial como en el Ecuador. Como se muestra en la Figura 2, se puede tener un mayor control de las condiciones ambientales y como consecuencia de esto, el rendimiento de los cultivos mejora significativamente. Este tipo de práctica tiene ciertas ventajas como la optimización del uso del agua, control de pérdidas a causa de heladas, ataque de insectos y la irrupción de malezas. Sin embargo, el uso de agroquímicos e insumos de difícil reciclaje y el alto costo de inicialización resultan ser un problema.[9], [10]



Figura 2. Cultivos en ambientes controlados [11]

Dentro de los invernaderos se puede sembrar cualquier tipo de plantas, sin embargo, debido a la creciente demanda de productos naturales por sus beneficios que ofrecen las mismas, nos enfocaremos en cultivos de plantas medicinales, describiendo las

propiedades del suelo y ambiente que deben tener estas plantas para su óptimo desarrollo.

1.3.3 Cultivo de plantas medicinales

a. Cedrón (Aloysia citrodora)

El Cedrón es una planta arbustiva, puede alcanzar una altura entre 1,50 y 2,50 metros. Tiene tallos largos, leñosos, redondos o angulosos, extendidos en la parte superior. Se desarrollan de manera óptima en suelos de consistencia media, sueltos, permeables, profundos, pH entre 6,5 y 7,2, el exceso de agua causa la podredumbre de raíces. Se desarrolla en un ambiente templado-cálido a templado.[12]

b. Menta (Mentha spicata)

La menta es una planta que se adapta fácilmente a diferentes tipos de suelos. No obstante, su crecimiento optimo se produce en suelos profundos, húmedos y fértiles, con un pH en el rango de 5.6 a 7.5. Si la menta ha sido recién plantada, el suelo debe mantenerse constantemente húmedo evitando que se produzca encharcamientos. Una vez que la menta haya asentado bien sus raíces, los riegos deben realizarse de manera más esporádica.[13]

c. Ataco (Amaranthus hybridus L.)

Amaranthus hybridus es una planta que cumple su ciclo de vida en un año, tiene flores pequeñas, verdes y unisexuales. Para una adecuada germinación el ambiente en el que se desarrolla debe tener una temperatura entre 12,8°C 37°C [14]. El ataco puede desarrollarse en un amplio rango de pH, sin embargo, para que crezca de manera óptima lo ideal es que tenga un pH entre 4,5 y 8,5.[15]

d. Hierba Luisa (Cymbopogon citratus)

La hierbaluisa es una planta con propiedades aromáticas y medicinales, puede alcanzar hasta un metro de altura, se adapta a una extensa variedad de entornos. El clima ideal en el que crece de manera óptima es cálido y húmedo con temperaturas en el rango de

20 y 30 ^{o}C [16]. A pesar de que tolera periodos cortos de sequía, el riego adecuado es muy importante para que tenga un crecimiento optimo.[17]

e. Manzanilla (Matricaria chamomilla)

La manzanilla es una planta con propiedades medicinales y aromáticas, cumple su ciclo de vida en un año, puede alcanzar los 60 cm de altura. La manzanilla crece en regiones de clima templado frio. Para que la planta crezca en óptimas condiciones es necesario que los suelos sean neutros a alcalinos, permeables, bien drenados, con buena retención de humedad para la etapa inicial, posterior a esto los riegos deben ser poco profundos y frecuentes.[18]

f. Clavel (Dianthus caryophyllus)

En una planta herbácea cuya floración se produce durante todo el año, puede alcanzar una altura entre los 45 y 60 centímetros. Con temperaturas menores a 8°C y superiores a 25°C el crecimiento de la planta es alterada. La humedad adecuada para el cultivo oscila entre 60 y 70%, valores de humedad fuera del rango hacen que la planta sea susceptible a plagas y enfermedades. El pH de suelo optimo debe rondar entre 6,5 y 7,5.[19]

g. Orégano (Oresiganum vulgare)

Es una planta que vive más de dos años, con una altura entre 30 y 80 centímetros. Crece de manera adecuada en una gran variedad de suelos, sin embargo, para un óptimo desarrollo, el suelo debe tener buen drenaje de tipo franco a franco arenoso. En cuanto al pH lo ideas es que el suelo sea ligeramente ácido a neutros (6.1 a 7.3). El clima adecuado para el orégano es templado a templado cálido, sin embargo, soporta heladas y bajas temperaturas. En situaciones de alta humedad y temperatura hacen que la planta sea susceptible a problemas fúngicos.[20]

h. Escancel (Aerva sanguinolenta)

Es una hierba con propiedades medicinales. Esta planta crece en condiciones semiáridas y es altamente tolerante a la sequía, sin embargo, se debe regar

semanalmente. La temperatura ideal en la que se desarrolla es entre 20°C – 38°C [21]. La planta crece de manera óptima en suelos con pH medianamente ácidos (5.8).[22]

i. Mortiño (Vaccinium floribundum)

El mortiño es un arbusto silvestre de hojas muy pequeñas con el margen aserrado o crenado. Esta planta crece en climas templados y fríos, con temperaturas de 8 a 16 °C en suelos húmedos y bien drenados.[23]

j. Malva (Malva sylvestris)

La Malva sylvestris es una planta herbácea de hasta unos 150 cm de altura. La planta se desarrolla de manera óptima en un clima tropical, con humedad relativa de 80% y suelo arcilloso-arenoso, arcilloso, con elevado contenido de materia orgánica.[24]

La implementación de la tecnología en los sectores agrícolas cada vez es más visible. Muchas de estas tecnologías están al alcance de productores grandes, medianos y pequeños lo cual hace que mejore la sostenibilidad ambiental. A continuación, se abordará como estas tecnologías han transformado el sector agrícola, presentando enfoques innovadores, los mismos que permiten un uso de recursos eficiente.[25]

1.3.4 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión abarca un conjunto de tecnologías que se puede usar en la producción agrícola, las cuales tienen como objetivo resolver problemas acerca del uso inadecuado de los recursos y del impacto ambiental. [26]

La Tabla 1 muestra algunas de las tecnologías empleadas en la Agricultura de Precisión.

Tabla 1. Tecnologias aplicadas a la agricultura [26]

Tecnologías	Características
Imágenes de satélite	Seguimiento de impactos ambientales.
Maquinaria de conducción autónoma	Trabaja con GPS.
Drones	Cámaras multiespectrales y térmicas. Sensores de medición.
Sensorización en parcelas	Estaciones meteorológicas.
Mapeo del suelo	Evalúa características de suelo.
Sistema de información geográfico	Ubicación exacta de maquinaria.

1.3.5 Smart Farming

La agricultura inteligente se basa en las tecnologías de internet de las cosas (IoT), teniendo como objetivo el aumento de productividad y mejorar la calidad del producto. Para lograr su objetivo usa tecnologías como: vehículos aéreos no tripulados (UAV), procesamiento de imágenes, computación en la nube y redes de sensores inalámbricos (WSN). Se puede considerar que Smart Farming es la evolución del término agricultura de precisión.[27]

La agricultura de precisión pretendía reducir el uso de insumos químicos utilizándolos solo en áreas específicas y cuando era necesario. Sin embargo, con la constante evolución de la tecnología mediante Smart Farming se pretende reducirlos aún más, haciendo un énfasis especial en la gestión del agua, control del proceso de fertilización y predicción de enfermedades, entre otros.[27], [28]

Algunas de las ventajas de la agricultura inteligente se resumen en: aumentar la cantidad de datos adquiridos en tiempo real sobre los cultivos, monitoreo remoto, control del agua y otros recursos naturales, mejora la gestión del ganado, evaluación de la tasa de suelo y cultivos y por último la mejora de la producción agrícola.[28]

1.3.6 Sistemas IoT

El internet de las cosas es una red física de dispositivos capaces de transmitir datos hacia otros, sin intervención humana. Estos dispositivos pueden recolectar datos de sensores a los cuales se le asigna un identificador único (UID), generando reportes para informar a los usuarios o para la automatización de alguna acción.[29]

a. Características del IoT

Las siguientes son las principales características que definen el internet de las cosas:

- Conectividad: los dispositivos IoT están conectados a través de varios protocolos como wifi, redes celulares, Bluetooth, LoRa, Zigbee, etc.[30]
- Dispositivos y sensores: dispositivos equipados con sensores que recolectan datos de sus alrededores.[30]

- Procesamiento de datos: los datos son procesados localmente ya sea mediante las arquitecturas edge computing o cloud computing.[30]

- Automatización: los dispositivos IoT operan de manera autónoma o responden a condiciones predefinidas sin intervención humana.[30]

b. Sistemas de medición IoT

La información es recopilada mediante sistemas embebidos los cuales son módulos programables, es decir, FPGAs (Field Programmable Gate Arrays). En la Figura 3 se observa que estos sistemas constan con sensores que miden y recopilan información de parámetros ambientales.[31]

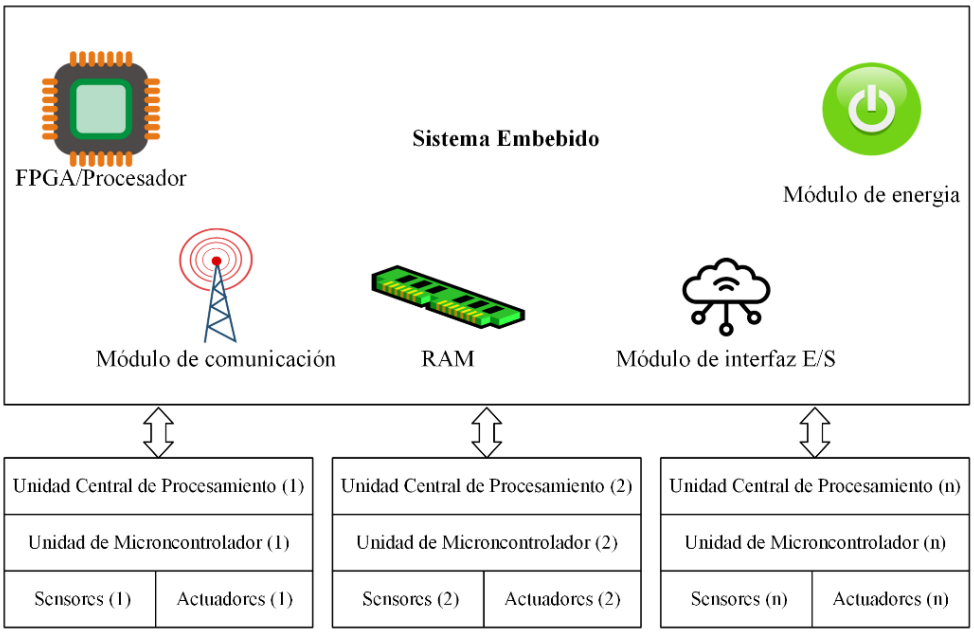


Figura 3. Arquitectura de un dispositivo de medición IoT [31]

Los sensores usados en dispositivos IoT deben ser diseñados para trabajar en entornos abiertos, capaces de soportar los efectos del clima, humedad, temperatura inestable durante su ciclo de vida como se observa en la Figura 4. Existen varios tipos de sensores según sea su operación requerida, en lo que a la agricultura inteligente se refiere los sensores se dividen en: sensor de ubicación, sensor óptico, sensor mecánico, sensor electroquímico y sensor de flujo de aire.[31]

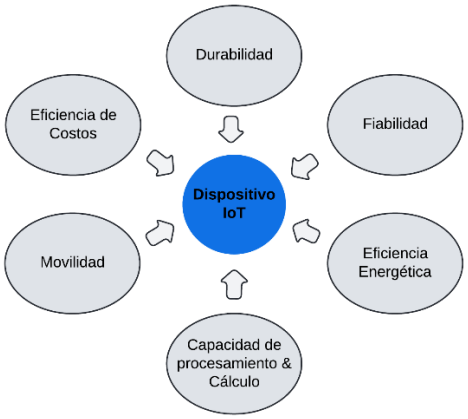


Figura 4. Características de dispositivos IoT [31]

c. Internet de las cosas (IoT) aplicado a la agricultura

En la última década se ha visto un avance significativo en las redes de sensores, haciendo que las mediciones y recolección de datos sea más fácil [32]. En la agricultura, la IoT se la puede emplear en una vasta gama de actividades, y las aplicaciones se dividen en cuatro categorías: sistemas de gestión, sistemas de monitoreo, sistemas de control y maquinaria no tripulada como muestra la Figura 5.[33]

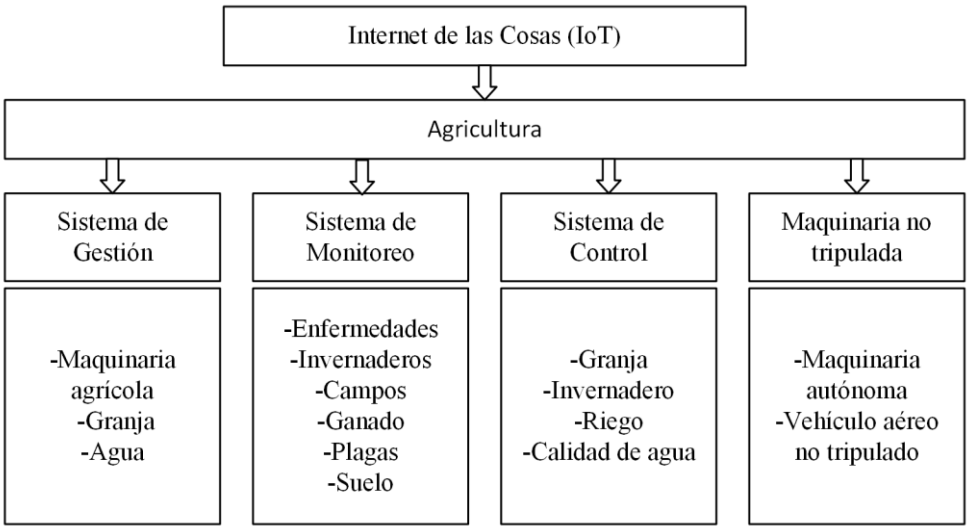


Figura 5. Categorías del IoT aplicado a la agricultura [33]

En la actualidad se está empleando redes de sensores para automatizar diversas actividades en el sector agrícola, los cuales se analizará a continuación.

Sistema de riego inteligente. Es un sistema de riego artificial que controla la cantidad de agua que necesitan los cultivos. Mediante este sistema se pretende evitar el desperdicio de agua. Generalmente consta de sensores de humedad de suelo, y de condiciones ambientales como temperatura y humedad relativa.[34]

Sistema de fertilización inteligente. El fertilizante puede ser natural o artificial los cuales tienen como objetivo mejorar la productividad de los cultivos. Para una fertilización adecuada es necesario el uso de una red de sensores que midan la fertilidad del suelo en tiempo real, lo cual ayuda a encontrar los lugares exactos donde se necesita fertilizar.[34]

Sistema inteligente de control de plagas y detección temprana de enfermedades. Este tipo de sistema se compone de sensores que recolectan datos del suelo y ambiente para su posterior análisis. Se usan sensores térmicos, sensores RGB, sensores de imágenes de fluorescencia. Los sensores térmicos miden el estado del agua en la planta. Las imágenes RGB permite percibir el objeto biométrico de las plantas. Los sensores de fluorescencia permiten distinguir actividades fotosintéticas de las plantas.[34]

d. Arquitecturas de los sistemas IoT

Una arquitectura IoT describe como los dispositivos, aplicaciones y tecnologías interactúan entre sí para ofrecer la funcionalidad deseada. La arquitectura IoT detalla las capas, componentes y las relaciones entre ellos, proporcionando una guía para el flujo de datos desde el nivel del dispositivo hasta el nivel de aplicación [35]. A continuación, se describe cada arquitectura y modelo de un sistema IoT.

- ***Arquitectura de 3 capas.*** Es considerada una de las arquitecturas más básicas puesto que fue propuesta en los inicios de la investigación de sistemas IoT. En la Figura 6 se muestran las capas de esta arquitectura.[36]
    - Aplicación: representa una abstracción de los servicios IoT, son solicitados por el usuario a través de una API.
    - Transporte: permite la comunicación entre internet y los dispositivos IoT.
    - Percepción: intermediario entre el ambiente y el mundo digital

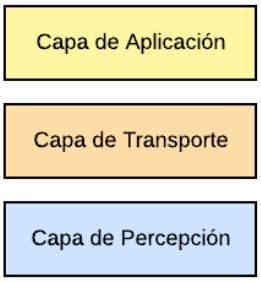


Figura 6 . Arquitectura básica de 3 capas [36]

En la arquitectura de capa 3 podemos encontrar también la arquitectura de sincronización de reloj de un sistema de acceso IoT. Permite que dispositivos de recursos limitados puedan ser considerados para formar parte de un sistema IoT. Debido a su sistema de acceso esta arquitectura asegura su escalabilidad.[36]

Como se muestra en la Figura 7, las tres capas de esta arquitectura son [36]:

- Adquisición: inicia y sincroniza el reloj de referencia del sistema.
- Mantenimiento: mantiene operativo el reloj del kernel de cada sistema.
- Distribución: sincroniza el reloj de todo el sistema IoT mediante NTP o directamente por la interfaz de comunicación RS232.

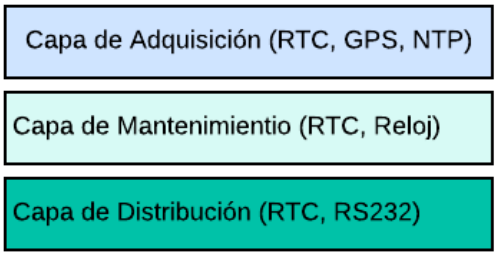


Figura 7. Arquitectura de sincronización de reloj [36]

Por otro lado, en la Figura 8 se muestra la arquitectura biométrica descentralizada de 3 capas. Es una versión mejorada de una arquitectura de 3 capas tradicional la cual asegura escalabilidad y administración completa del sistema, la cual se centra en la detección de rostros.[36]

Está compuesto por las siguientes capas [36]:

- Dispositivo: recolecta los datos provistos por las cámaras.

- Borde: procesa, almacena y transmite los datos.
- Aplicación: reside el servicio y aplicación de detección e identificación facial.

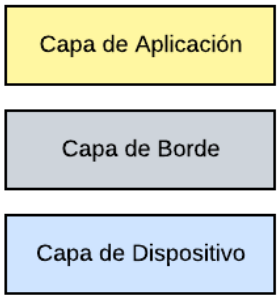


Figura 8. Arquitectura biométrica descentralizada de 3 capas [36]

Finalmente tenemos la arquitectura IoT bajo un esquema pregunta-respuesta. Está orientada para aplicaciones de ciudad inteligente, por lo que emplea módulos con sensores embebidos, los cuales tienen la capacidad de intercambiar información con diferentes usuarios.[36]

Los elementos de esta arquitectura son [36]:

- Aplicación de Front-end: contienen la aplicación, lo cual permite recibir y postear preguntas por parte de usuarios.
- Módulo de aprendizaje: contiene los sensores, procesa los datos, y recibe mensaje de diferentes nodos.
- Comunicaciones: permite la comunicación entre diferentes módulos.

- ***Arquitectura de 4 capas.*** A continuación, se presenta alguna de las arquitecturas de 4 capas.

La Figura 9 muestra la arquitectura IoT basado en NFV (Virtualización de Funciones de Red) que describe un entorno en donde los dispositivos IoT están conectados a través de una puerta de enlace IoT. El enfoque NFV permite que la puerta de enlace sea muy simple y no contenga ninguna lógica de aplicación.[37]

Las 4 capas de esta arquitectura son [36]:

- Sensores y Actuadores: encargado de sensar y recolectar datos.
- IoT Gateway: provee compatibilidad entre protocolos.
- Red IP: encargado de intercambiar información entre el centro de datos y IoT Gateway.
- Data center: soporta las aplicaciones IoT.

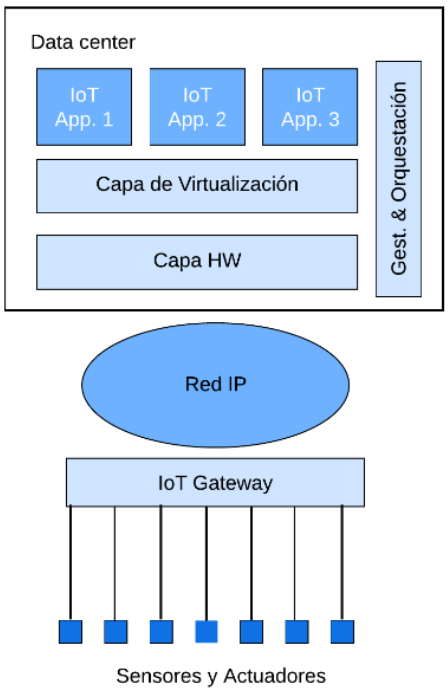


Figura 9. Arquitectura IoT basado en NFV [37]

- ***Arquitectura de 5 capas***. En la Figura 10 se presenta la arquitectura propuesta que pretende resolver problemas de seguridad y almacenamiento. Esta implementación integra tecnologías como software de base de datos, procesamiento inteligente, computación en la nube, computación ubicua, entre otros.[38]

Esta arquitectura tiene las siguientes capas [36]:

- Detección: responsable de la conexión de dispositivos de recolección de información.
- Red: transmite la información.

- Middleware: soluciona problemas de compatibilidad, además, almacena, procesa datos y administra servicios.
- Aplicación: solicitado por usuarios mediante APIs.
- Negocio: analiza datos para la toma de decisiones.

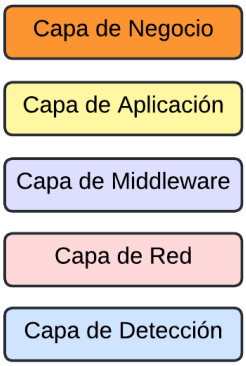


Figura 10. Arquitectura de 5 capas [36]

- ***Modelo de referencia ITU Y.4000/Y.2060.*** Es similar a las arquitecturas propuestas anteriormente. Sin embargo, como se muestra en la Figura 11, este modelo propone de manera paralela la capacidad de gestión y capacidad de seguridad [39]. A continuación, se describe cada una de sus capas.

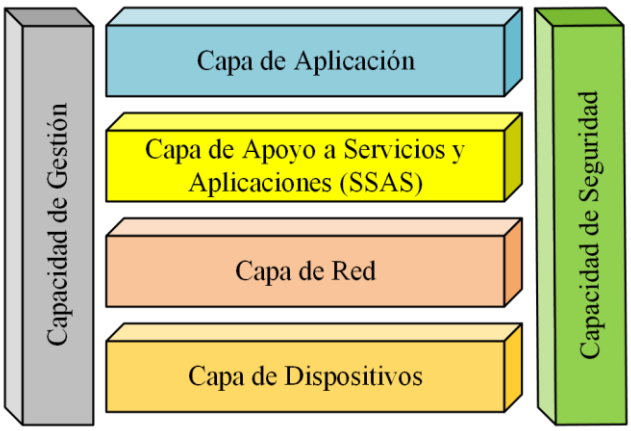


Figura 11. Modelo de referencia ITU Y.400/Y.2060 [39]

La capa de dispositivos es la encargada de gestionar los dispositivos que conforman el sistema IoT. En esta capa encontramos dos tipos de funcionalidades las cuales son: las capacidades de dispositivos y de Gateway como se observa en la Figura 12.[39]

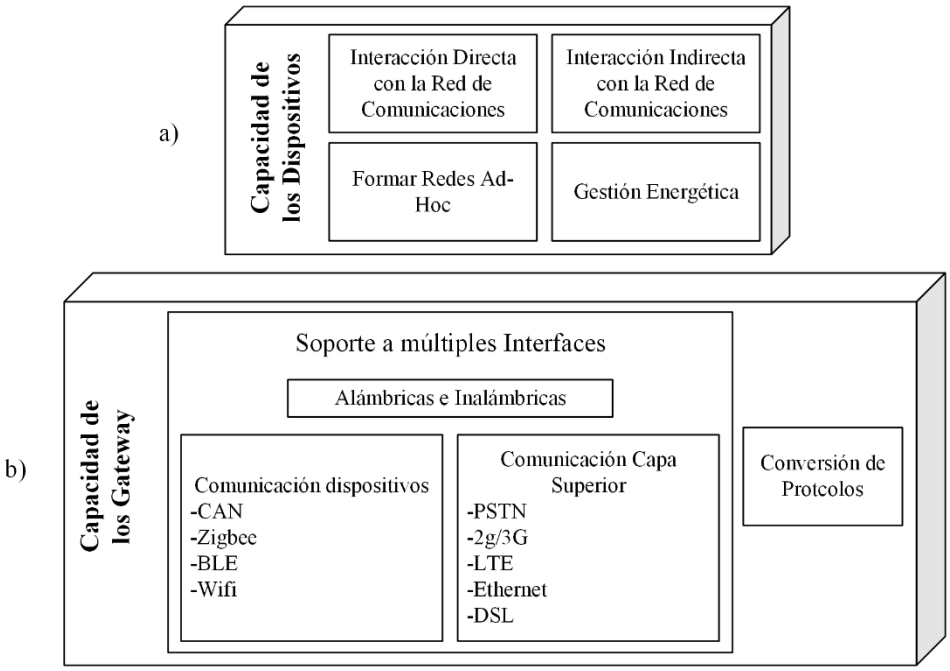


Figura 12. a) Capacidades de dispositivos, b) Capacidad de Gateway [39]

La capa de red permite la comunicación entre la capa de dispositivos y capas superiores, lo que significa que transmite los datos obtenidos y envía órdenes a los dispositivos. En la Figura 13 se observar con más detalle las funcionalidades de esta capa.[39]

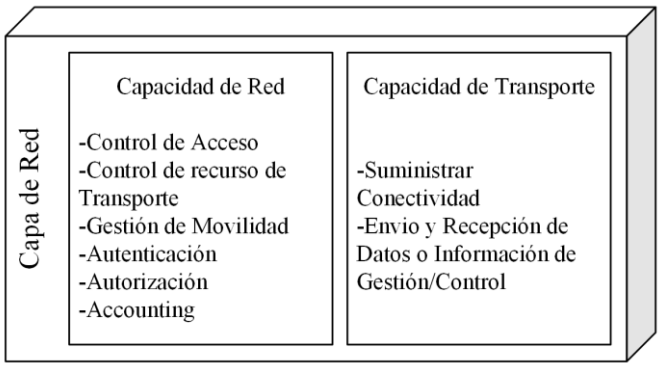


Figura 13. Capacidades de la capa de Red del modelo ITU Y.4000/2060 [39]

La función de la capa de Apoyo a Servicios y Aplicaciones es la de soporte genérico y soporte especifico. El soporte genérico resuelve necesidades comunes de cualquier tipo de servicio o aplicación. El soporte especifico atiende necesidades únicas requeridas por los servicios o aplicaciones.[39]

La capa de aplicación es la encargad de realizar la interacción entre el sistema IoT y los usuarios finales.[39]

Por último, tenemos las Capacidades de Gestión y Seguridad, como se muestra en la Figura 14 se observa que esta contempla capacidades adicionales que involucran las capas antes mencionadas. Abarcan la gestión de fallos, configuración, el rendimiento y seguridad.

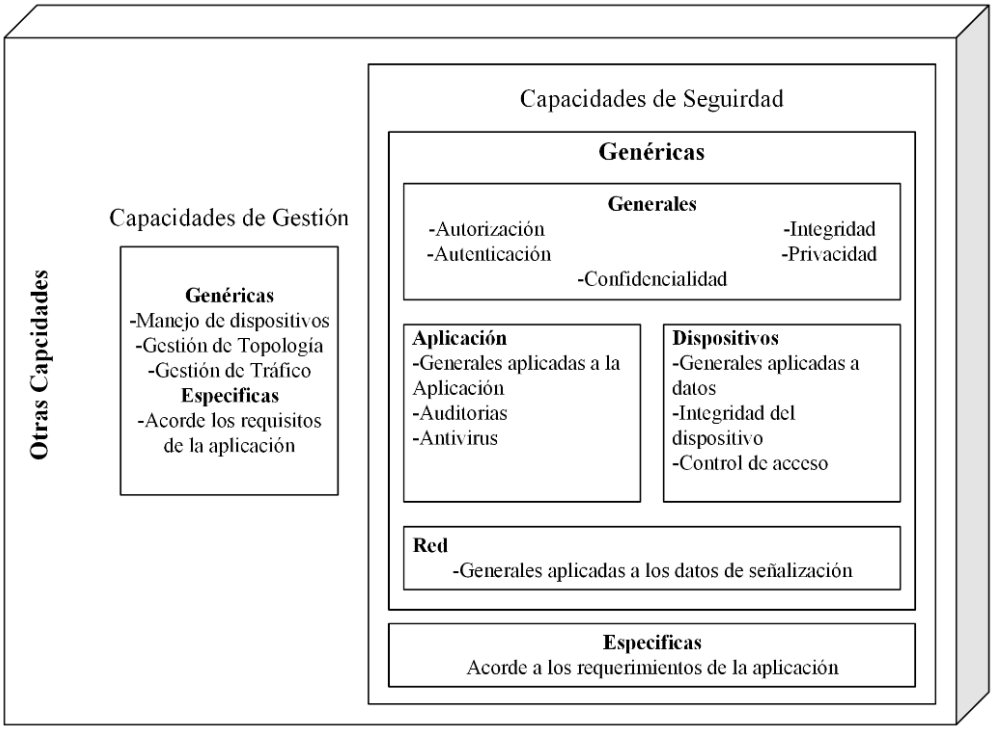
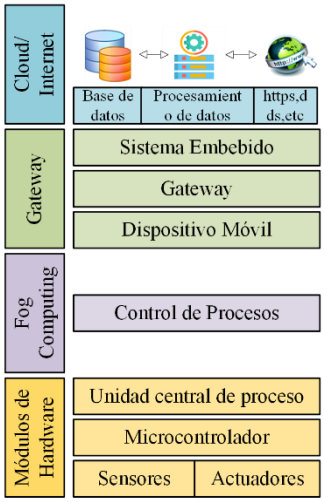


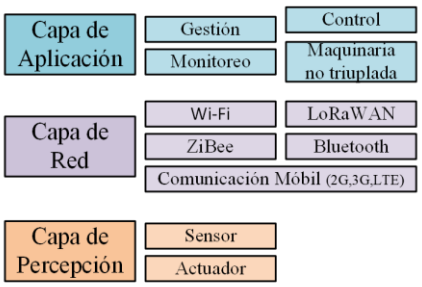
Figura 14. Capacidades de Gestión y Seguridad del modelo ITU Y.4000/2060 [39]

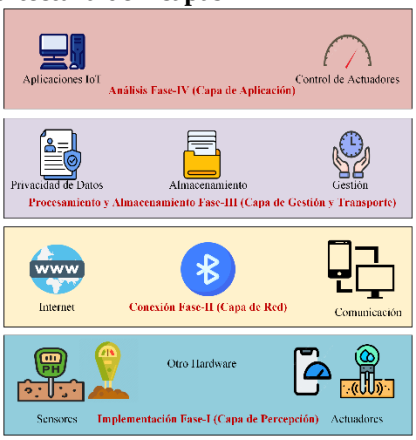
1.3.7 Arquitecturas IoT aplicados a los sistemas agrícolas

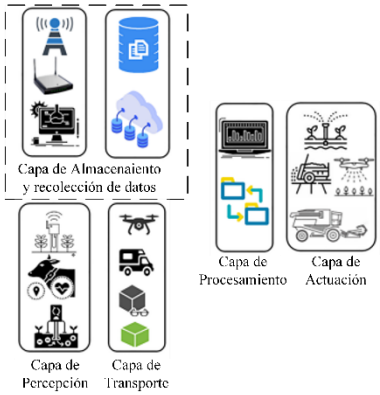
En la sección de Sistemas IoT específicamente en el apartado Arquitecturas de los sistemas IoT se presenta una visión general de las arquitecturas que son usadas para estos sistemas. No obstante, en la Tabla 2 se exponen arquitecturas que son empleadas específicamente en los sistemas de monitoreo y control agrícolas teniendo en cuenta las arquitecturas de 3, 4 y 5 capas.

Tabla 2. Arquitecturas IoT Aplicados a la Agricultura [31], [33], [40], [41]

<table>
<tr>
<td>Cloud-Assisted


Arquitectura de agricultura de precisión asistida por la nube.</td>
<td>Arquitectura de 3 capas


Se puede dividir en una capa de percepción para reconocimiento, una capa de red para transmisión y recepción de datos y una capa de aplicación para aplicaciones agrícolas.</td>
</tr>
<tr>
<td>Arquitectura de 4 capas


Capa de percepción: sensores, actuadores.
Capa de red: establece la conexión inalámbrica.
Capa de transporte y gestión: procesa la información.
Capa de aplicación: los datos analizados se presentan al usuario final.
</td>
<td>Arquitectura de 5 capas


Capa de percepción: red de sensores
Capa de transporte y recopilación de datos: recibe y agrupa los datos.
Capa de almacenamiento: bases de datos, big data o tecnología blockchain.
Capa de procesamiento de datos: extrae información y la incorpora a un sistema capaz de tomar decisiones.
Capa de actuación: reciben y ejecutan instrucciones.
</td>
</tr>
</table>

1.3.8 Comunicación inalámbrica utilizadas en la agricultura

La tecnología inalámbrica ha avanzado a pasos agigantados. Existen diversas tecnologías de este tipo como Wifi, LoRaWAN, comunicación móvil, ZigBee y Bluetooth. Todas estas tecnologías se las puede aplicar en la agricultura permitiendo

automatizar todo el ciclo agrícola [33]. En la Tabla 3 se menciona las características principales de cada una de las tecnologías inalámbricas aplicadas a la agricultura.

Tabla 3. Características de las tecnologías inalámbricas usadas en la agricultura [33]

Protocolos inalámbricos	Estándar	Frecuencia	Tasas de datos	Rango de Tx	Consumo de energía	Costo
Wifi	IEEE 802.11 a/c/b/d/g/n	5-6GHz	1 Mbps–7Gbps	20-100 metros	Alto	Alto
LoRaWAN	LoRaWAN R1.0	868-915 MHz	0.3-50Kbps	<30 Km	Muy bajo	Alto
ZigBee	IEEE 802.15.4	2.4GHz	20-250 Kbps	10-20 metros	Bajo	Bajo
Bluetooth	IEEE 802.15.1	2.4GHz	1-24 Mbps	8-10 metros	Muy bajo	bajo
Comunicación móvil	2G (GSM), 2,5G (GPRS), 3G (UMTS, CDMA2000), 4G (LTE)	2,4 GHz	200 kbps, 4G: 0,1–1 Gb/s	Toda el área celular	Medio	Medio

1.3.9 Tecnología LoRa

LoRa es una tecnología de modulación capaz de operar en bandas sin licencia como 915 MHz, 868 MHz o 433 MHz, según las regulaciones del país en el que se lo emplea. Esta tecnología es de largo alcance, en situaciones con línea vista o área rural puede llegar hasta 10 o 20 Km. LoRa tiene la capacidad de transmitir datos con velocidades de 250 bps a 5.5 Kbps con CSS y hasta 50 KB/s con FSK. Proporciona distintas opciones para ortogonalizar transmisiones tanto como sea posible, como la frecuencia de portadora (CF), el factor de propagación (SF), el ancho de banda (BW) y la velocidad de codificación (CR), lo que permite que no exista colisión en la comunicación.[42]

1.3.10 Tecnología LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de red de capa MAC basado en la nube, es una tecnología LPWAN que permite la conexión inalámbrica de distintos objetos hasta internet, permitiendo una comunicación bidireccional, protección de extremo a extremo, movilidad y localización. Este protocolo permite enrutar la capa de red entre las puertas de enlace de LoRaWAN y los dispositivos LoRa. También administra la

velocidad de datos, frecuencia de comunicación y potencia de transmisión para todos los nodos de la red. En la Figura 15 se muestra la arquitectura de red LoRaWAN donde los dispositivos finales transmiten datos hasta el Gateway y esta a su vez reenvía los datos al servidor en la nube (The Things Network) donde los datos duplicados son filtrados. Mediante cualquiera de los complementos de integración la información es reenviada hasta los servidores de aplicaciones.

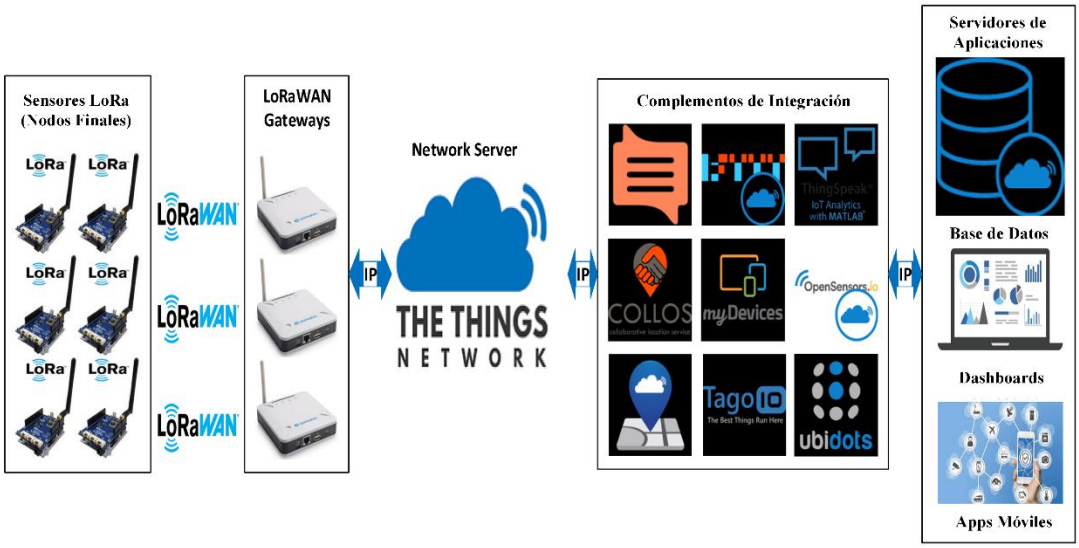


Figura 15. Arquitectura red LoRaWAN

1.3.11 Caracterización del suelo

Para un muestreo adecuado del suelo se debe tener en cuenta el tipo de suelo y tipo de cultivo. Por lo general, las plantas tienen su mayor densidad reticular en unos 20 cm, por lo que el estándar del muestreo se lo recomienda hacerlo de 0 a 20 cm de profundidad. Existen diversos métodos de muestreo que se deben tomar en cuenta si se quiere realizar un muestreo adecuado, los cuales son: aleatorio simple, aleatorio estratificado, en cuadricula, en X, y zigzag.[43]

- El muestreo en cuadricula se lo realiza dividiendo un lote en partes iguales, como se muestra en la Figura 16.[43]

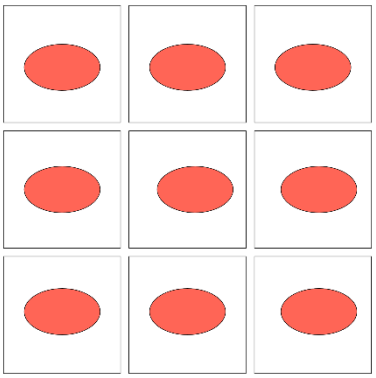


Figura 16. Muestreo en cuadrícula [43]

- El muestreo en Zigzag se realiza cada 25 a 30 paso a partir de un punto seleccionado en forma cruzada, como se muestra en la Figura 17.[43]

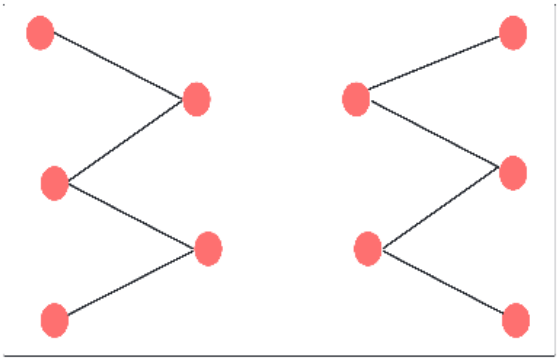


Figura 17. Muestreo en Zigzag [43]

- El recorrido en X consiste en realizar un muestreo en cada lote de terreno en forma de X, como se muestra en la Figura 18. Es común realizarlo en terrenos planos y en cultivos anuales y semi perennes.[43]

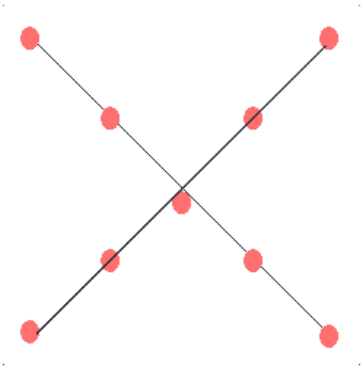


Figura 18. Muestreo en X [43]

- El muestreo aleatorio simple se lo realiza escogiendo varios puntos al azar , como se observa en la Figura 19. Generalmente se lo realiza en cultivos anuales y pasturas.[43]

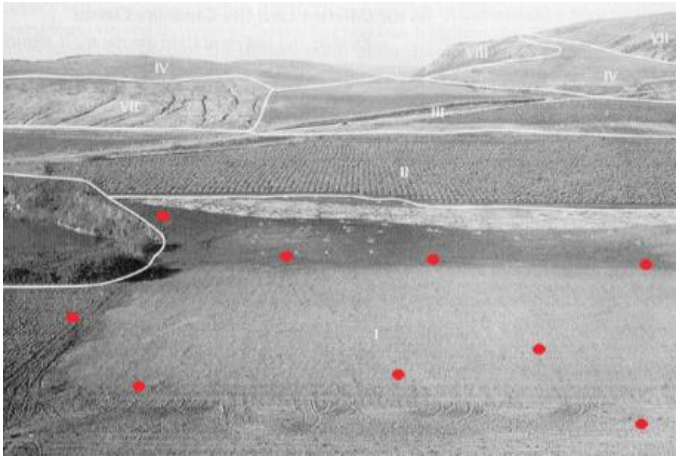


Figura 19. Muestreo aleatorio simple [43]

- El muestreo aleatorio estratificado se realiza dividiendo lotes a muestrear en estratos y tomando muestras de cada estrato. Generalmente se lo realiza en laderas o terrenos colinados, como muestra la Figura 20.[43]

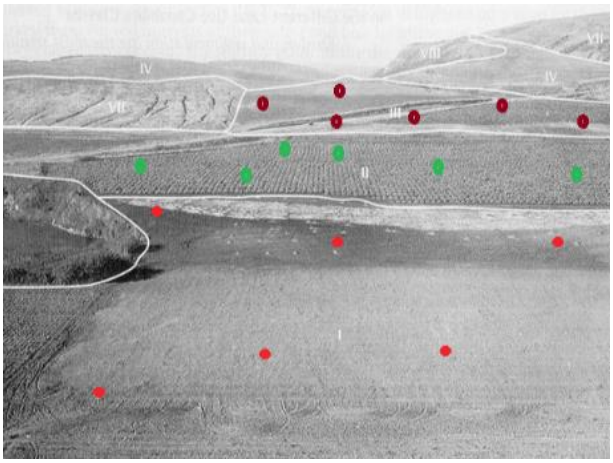


Figura 20. Muestreo aleatorio estratificado [43]

1.3.12 Hardware y Software

Para realizar de manera adecuada la selección de dispositivos, se realizó tablas comparativas donde se enlistan todas las características técnicas más importantes de

los dispositivos a usarse en cada etapa que se debe tener en cuenta y en base a estas apreciar sus ventajas y desventajas de cada una.

La Tabla 4 muestra las principales características técnicas de diferentes microcontroladores ESP32 equipados con la tecnología LoRa. Además, son de bajo consumo de energía, para la selección de alguna placa de desarrollo se debe tener en cuenta la frecuencia en la que se trabaja en el Ecuador (Anexo A). Estas placas de desarrollo son programables y se los trabaja en un entorno de desarrollo integrado (Arduino IDE).

Tabla 4. Tabla comparativa de módulos LoRa.[44], [45], [46]

Características	**LILYGO LoRa32 915Mhz ESP32** 	**Wifi Lora Esp32 Sx1278 510 433mhz Oled 0.96 Wifi** 	**LILYGO T-Beam Meshtastic LORA32 915MHz ESP32 TTGO** 
Procesador	ESP32	ESP32-S3FN8	ESP32 MCU
Voltaje de entrada	3.7V-5V	3.3V-7V	1.8 V– 3.7V
Rango de temperatura de funcionamiento	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C	-40°C ~ +85°C
Puertos GPIO de E/S	19	26	14
Potencia de Tx	+20dBm	Hasta +20dBm	Hasta +20dBm
Frecuencia de funcionamiento	868/915/923 MHz	868MHz / 915MHz / 923MHz	868MHz / 915MHz / 923MHz
Velocidad de datos	1.2K~300Kbps@FSK 0.018K~37.5Kbps@LoRa	150 Mbps 11n HT40. 72 Mbps 11n HT20. 54 Mbps 0.39 oz. 11 Mbps 11b.	1,2 K ~ 300Kbps @ FSK
Tecnología	LoRa Wifi Bluetooth I2C	LoRa Wi-Fi Bluetooth I2C	LoRa Wi-Fi Bluetooth 4.2 GPS
Flash	4MB	4MB	4MB
Costo	$24.50	$25.99	$37.50

En la Tabla 5 se presenta distintos modelos y características técnicas destacadas de los sensores de suelo. Cada uno de los sensores cumple con la normativa IP68, siendo estos a prueba de agua y polvo. Estos sensores tienen la capacidad de medir parámetros claves como humedad, pH, temperatura, conductividad y NPK, lo que los convierte en herramientas ideales para aplicaciones agrícolas.

Tabla 5. Tabla comparativa de sensores de suelo.[47], [48], [49]

Características	**TDR-315L** 	**RK520-02** 	**TEROS 12** 
Voltaje de alimentación	3-30V DC	5VDC, 12-24VDC	5VDC, 12-24VDC
Temperatura de funcionamiento	-40℃ ~ +85℃	-40℃ ~ +80℃	-40℃ ~ +60℃
Variables que mide	Temperatura Humedad EC PH	Humedad Temperatura EC	Humedad Temperatura EC
Parámetros de temperatura	Rango de medida: -40℃~+85℃ Exactitud: ±5℃ Tiempo de respuesta: ≤15s	Rango de medida: -30-+70℃ Exactitud: ±5% ℃ Tiempo de respuesta: 1s	Rango de medida: -40 a 60 °C Exactitud: ± 1.0 °C de -40 a 0 °C, ± 0.5 °C de 0 a 60 °C Resolución: 0.1 °C
Parámetros de humedad	Rango de medida: 0-100% RH Exactitud: 2% (0-50%), 3% (50-100%) Tiempo de respuesta: ≤4s	Rango de medida: 0-100% (m^3/m^3) Exactitud: ±2%(0-20%), ±3%(51-100%) Tiempo de respuesta: 1s	Rango de medida: 0 a 70% de VWC Exactitud: ± 0.03 m3/m3 (3% VWC) Tiempo de respuesta: 25-50ms
Parámetros de EC	Rango de medida: 0-20000us/cm Exactitud: ±5% ($0-10000\frac{us}{cm}$); ±5% ($10000-20000\frac{us}{cm}$) Tiempo de respuesta: ≤1s	Rango de medida: 0-10mS/cm Exactitud: ±3% FS Tiempo de respuesta: 1s	Rango de medida: 0 a 20 dS/m Exactitud: ± 5% de 0 a 10 dS/m, ± 8% de 10 a 20 dS/m Resolución: 0.01 dS/m Tiempo de respuesta: 25-50ms
Parámetro de PH	Rango de medida: 3-9 PH Exactitud: $\pm 0.3PH$ Tiempo de respuesta: ≤10s	----------	----------
Clase de protección	IP68	IP68	IP68
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Señal de salida	RS485	RS485	DDI Serial o SDI-12
Costo	$100.00	$118.29	$130.00

La Tabla 6 muestra sensores capases de medir temperatura y humedad del ambiente. Además, todos los sensores se los puede programar mediante Arduino IDE, haciendo que estos sean fáciles de usar con el microcontrolador.

Tabla 6. Tabla comparativa de sensores de ambiente. [48], [49], [50]

Características	**DHT11** 	**AM2315C** 	**HD9008** 
Alimentación	3.3~5.5 VDC	2.2V-5.5V DC	2.2V-5.5V DC
Variables que mide	Humedad relativa Temperatura	Humedad relativa Temperatura	Humedad relativa Temperatura
Parámetros de humedad relativa	Rango de medida: 0-100% RH Exactitud: ±3RH Tiempo de respuesta: 8s	Rango de medida: 0-100% RH Exactitud: ±2RH Tiempo de respuesta: 8s	Rango de medida: 0-100% RH Exactitud: ±2RH Tiempo de respuesta: 5s
Parámetros de temperatura	Rango de medida: -40~125 ℃ Exactitud: ±2 Tiempo de respuesta: <2s	Rango de medida: -40~80 ℃ Exactitud: ±2 Tiempo de respuesta: 5s	Rango de medida: -40~80 ℃ Exactitud: ±0.15ºC ±0.1% de medición Tiempo de respuesta: 5s
Comunicación	Digital	I2C	RS485
Material	Plástico	Plástico de alta resistencia	Plástico de alta resistencia
Costo	$3,50	$60,00	$80,00

La Tabla 7 presenta las características técnicas de tres microordenadores, diseñados para manejar tareas complejas de procesamiento.

Tabla 7. Tabla comparativa de microordenadores. [51], [52], [53]

Características	**Raspberry Pi 4 Modelo B** 	**Orange Pi 5** 	**Banana Pi BPI-M3** 
Voltaje de entrada	5V	5V	
CPU	4 núcleos de 64 bits ARM-Cortex A72 a 1.5GHz	8-core 64-bit. 4xCortex-A76 y 4xCortex-A55 a 1.8GHz.	Allwinner A83T ARM Cortex-A7 Octa-Core 1.8 GHz, 512KB L1 cache and 1MB L2 cache
RAM	4GB	4GB LPDDR4/4x	2 GB LPDDR3 (shared with GPU)
Puertos de conexión	28 pines GPIO. MIPI CSI de 2 carriles. USB 2.0 (X2). USB 3.0 (X2). HDMI. Ethernet Gigabit.	USB 2.0. USB 3.0. HDMI 2.1. MIPI D-PHY TX 4Lane. Ethernet Gigabit.	HDMI 1.4 (Type A Full). MIPI Display Serial Interface. USB 2.0 PORT (x2), USB OTG (x1)
Tecnología	Wi-Fi 802.11 b/g/n/ac. Bluetooth 5.0.	Wi-Fi6. Bluetooth 5.0.	Wi-Fi 802.11 b/g/n. Bluetooth BT4.0.
Costo	$174	$163.99	$120

El Gateway es fundamental en un sistema de comunicación LoRa, estos dispositivos cumplen la función de recibir y enviar datos de varios nodos, haciendo que el sistema sea escalable. Cuando se hace uso de este tipo de dispositivos es recomendable trabajar con el protocolo LoRaWAN. La Tabla 8 muestra las principales características técnicas de distintos Gateway, destacando las bondades de cada uno de los dispositivos.

Tabla 8. Tabla comparativa del Gateway.[54], [55], [56]

Características	HT-M02 Edge LoRa	RAK 2245	RAK 831
			
Fuente de alimentación	4.5~17V DC interfaz.	5V	4.8 V a 5.2 V, con un valor típico de 5.0 V.
Puertos	Encabezado de depuración UART, interfaz ETH, ranura para tarjeta SIM, toma de antena SMA*3	Interfaz SPI	Interfaz
Frecuencia de operación	868MHz / 915MHz / 923MHz	EU433, CN470, IN865, EU868, US915, AU915, KR920, AS920 and AS923	863 MHz a 870 MHz
Tecnología	LoRa 4G Wi-Fi 2.4GHz	LoRaWAN GPS	LoRaWAN GPS
Potencia de TX y RX	Hasta 26±1dBm	Potencia de TX de hasta 27 dBm. Sensibilidad de RX de hasta -139 dBm a 125KHz. Potencia de salda RF típica entre -6 dBm y 27 dBm.	Potencia de TX de hasta 23 dBm. Potencia de RX de hasta -139 dBm
Costo	$400.00	$120.00	$160.00

Las herramientas de visualización son de suma importancia cuando se requiere analizar y presentar datos mediante graficas para su fácil entendimiento. Por lo que, en la Tabla 9 se muestran algunos de los Dashboards más usados como son Grafana, Node-RED y Zabbix con sus respectivas bondades de cada una, de esta manera, se pretende facilitar la selección de un software para el diseño de un sistema de gestión de la información.

Tabla 9. Tabla comparativa entre Dashboards. [57], [58], [59]

Característica	Node-Red	Grafana	Zabbix
Licencia	Código abierto	Código abierto	Código abierto
Integración	OPC UA MQTT REST API ODBC Mongo DB SQL Azure Google Amazon Web Service Archivos XML	MQTT HTTP/1.1 HTTP/2 WebSockets gRPC SQL Xafka ZeroMQ	SNMP MQTT HTTP ICMP AWS SQL Docker
Escalabilidad	Medio (proyectos pequeños a medianos)	Alta (gestión de grandes volúmenes)	Alta
Consumo de recursos	Bajo a medio	Medio a alto	Medio a alto
Multiplataforma	Linux Windows Centos Ubuntu Debian ARM	Microsoft Windows Linux MacOS	Windows Solaris Mac OS X HP-UX OpenBSD NetBSD FreeBSD IBM AIX Linux
Interfaz de usuario	Grafica e intuitiva	Dashboards	Interfaz web

Las bases de datos son sistemas que permiten organizar y almacenar información. Pueden ser relacionales o no relacionales, esto depende en que contexto se lo quiere usar. En la Tabla 10 se presenta las características de distintas bases de datos.

Tabla 10. Tabla comparativa entre bases de datos.[60], [61], [62]

Características	MySQL	InfluxDB	MongoDB
Licencia	Código abierto	Código abierto	Código abierto
Tipo	Relacional	NoSQL (Time Series)	NoSQL (Documental)
Estructura de datos	Tablas estructuradas con SQL	Series temporales	Documentos JSON
Escalabilidad	Altamente escalable	Arquitectura escalable	Vertical y horizontal
Integración IoT	Moderada	Muy alta	Alta

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Implementar un sistema electrónico para el monitoreo y control de variables agrícolas empleando los principios de Smart Farming y Agricultura de Precisión.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar características y variables a controlar y monitorizar en cultivos bajo invernadero en Susudel-Azuay.
- Establecer la arquitectura del sistema de monitoreo y control de variables en cultivos bajo invernadero.
- Determinar herramientas de hardware y software del sistema electrónico para control y monitoreo de cultivos bajo invernaderos.
- Diseñar un prototipo para controlar y monitorear variables en cultivos bajo invernadero.
- Desarrollar un sistema de gestión de información para el proceso de monitoreo y control de cultivos bajo invernadero.
- Aportar con los resultados obtenidos al proyecto de investigación "Enhancing the Agrifood Supply chain towards Industry 5.0 (AGRO5) in the Ecuadorian Andes".

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para el desarrollo del proyecto se usó sensores para la captura de datos tanto del suelo como del ambiente. Para recolectar datos del suelo se usó el sensor CWT Soil sensor (NPK type) que tiene la capacidad de medir humedad, temperatura, pH, conductividad y NPK, sin embargo, en este proyecto se midió humedad, pH y conductividad. Para recolección de datos del ambiente se usó el sensor DHT11 que permite medir variables como humedad y temperatura dentro del invernadero. La recolección de datos y control de actuadores se llevó a cabo mediante microcontroladores Heltec Lora32. Además, se usó como Gateway un HT-M02 Edge LoRa Gateway, que cumple la función de pasarela entre los microcontroladores y el servidor. Para el procesamiento, almacenamiento y visualización de datos se usó Node-Red, Influxdb y Grafana respectivamente, estos servicios fueron instalados en una Raspberry Pi 4B. En las Tabla 11 y Tabla 12 se detalla tanto el hardware como el software que se usó en el sistema.

Tabla 11. Hardware usado

Materiales	**Características**	**Descripción**
Sensor CWT Soil sensor (NPK type)	Sensor de suelo	Mide pH, humedad y conductividad.
DHT11	Sensor de ambiente	Mide humedad y temperatura.
HT-M02	Gateway LoRa	Pasarela entre microcontroladores y servidor.
Raspberry P 4B	Microordenador	Procesamiento de datos.

Tabla 12. Software usado

Software	**Características**	**Descripción**
Arduino IDE	Entorno de programación	Programación de sensores y protocolo LoRaWAN.
Node-Red	Editor de flujo	Procesamiento de datos.
Influxdb	Base de datos de series temporales	Almacenamiento de datos para análisis.
Grafana	Visualización de datos	Monitoreo de variables en tiempo real.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la investigación

Las modalidades de investigación empleadas en esta investigación son las siguientes:

Para este proyecto se emplea una investigación aplicada, puesto que se desarrolló un sistema electrónico para el control y monitoreo de variables agrícolas, donde se pone en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria como comunicación inalámbrica, programación y electrónica.

La investigación es de tipo bibliográfica, esto implicó una revisión y análisis crítico de literatura ya existente sobre agricultura de precisión y Smart Farming como artículos, revistas, libros y tesis.

Al ser una investigación de campo, fue necesario recolectar datos directamente en un invernadero, lo que permite un monitoreo detallado para un control preciso de sus condiciones ambientales, contribuyendo así a un mejor manejo de las prácticas agrícolas.

Finalmente, esta investigación es de tipo experimental puesto que se centrará en la implementación y evaluación del sistema electrónico, monitoreo y control de las variables agrícolas basado en los principios de Smart Farming y agricultura de precisión bajo un entorno controlado.

2.2.2 Recolección de información

Para la recolección de información se tomó varias fuentes de artículos académicos, repositorios de universidades, revistas de difusión científica en línea, cuya información teniendo relación directa con agricultura de precisión y Smart Farming aportando así me manera positiva el desarrollo del proyecto. En la Tabla 13 se detalla los criterios tomados en cuenta para la recolección de información.

Tabla 13. Recurso de información

Criterio	Descripción
¿Para qué?	Monitorear y controlar las variables agrícolas
¿De qué personas u objetos?	Invernadero de plantas medicinales
¿Cómo?	Mediante un sistema electrónico
¿Con que?	Usando sensores y actuadores
¿Cuándo?	En el periodo académico septiembre 2024 - febrero 2025
¿Dónde?	Susudel – Provincia del Azuay

2.2.3 Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Recolección detallada de información.
- Análisis de la información.
- Revisión bibliográfica de variables de investigación.
- Extracción de datos pertinentes para el proyecto de investigación.
- Pruebas de funcionamiento del sistema.
- Revisión de datos en base a pruebas realizadas.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo de la propuesta

El presente proyecto se llevó a cabo mediante una modalidad investigativa, bibliográfica y de campo, enfocándose en las principales variables agrícolas que se deben tomar en cuenta para que los cultivos alcances su máxima productividad.

El control de las principales variables agrícolas se lleva a cabo mediante un sistema electrónico, el cual está compuesta por redes de sensores encargados de medir las condiciones ambientales del suelo y ambiente dentro del invernadero. Los datos obtenidos por los sensores son leídos por dispositivos Heltec Lora32 que vienen equipados con la comunicación LoRa a 915 MHz según lo establecido por la Arcotel (Anexo A), enviando los datos recolectados hacia un Gateway para su posterior análisis y toma de decisiones mediante los actuadores según lo requiera dentro del invernadero.

3.1.1 Análisis del invernadero

El invernadero se encuentra ubicado en Susudel-Azuay y posee dimensiones de 13 metros de largo por 7 metros de ancho. Cuenta con un sistema de fertirriego, un método que consiste en la aplicación de fertilizantes solubles directamente a través del agua de riego. En su interior, las plantas están distribuidas en camas de cultivo, una disposición que favorece la optimización del espacio. Cada cama dispone de mangueras para el riego por goteo, lo que asegura una aplicación eficiente y controlada del agua y los nutrientes.

Debido al tamaño y distribución por camas del invernadero, se tiene la necesidad de implementar un sistema de automatización que permita gestionar de manera adecuada todos los recursos del invernadero, y que se pueda monitorear en tiempo real el estado del suelo como pH, humedad del suelo, conductividad eléctrica, temperatura y humedad relativa, minimizando la intervención humana y mejorando la productividad de los cultivos.

3.1.2 Requerimientos del sistema

Para el diseño del sistema electrónico de control y monitoreo es necesario tomar en cuenta el hardware y software que se va a usar, teniendo en cuenta las necesidades del invernadero donde se lo implementara. En la Tabla 14 se describen los elementos electrónicos que se requieren para la implementación del sistema de control y monitoreo.

Tabla 14. Hardware para el desarrollo del sistema electrónico. [45], [47], [51]

Dispositivo	Descripción	Características
Sensores	Capaces de medir pH, humedad de suelo y de ambiente, conductividad eléctrica y temperatura ambiental.	Sensor de pH debe medir rangos de 0-14pH. Sensor de humedad de suelo y ambiente capaz de medir entre 0-100%. Sensor de CE debe medir entre 0-300ms/cm. Sensor de temperatura capaz de medir entre 0-40 grados centígrados.
Módulo de adquisición y comunicación LoRa	Dispositivo para la adquisición de datos, control de actuador y que cuente con tecnología LoRa.	E/S analógicas y digitales. Alimentación entre 5-12 Vdc. Corriente entre 0.5-2A. Comunicación LoRa
Microordenador	Ordenador de bajo costo y tamaño reducido.	RAM de 4GB. Procesador de 64 bits. 2.4GHz y 5GHz.
Actuadores	Actuadores para controlar son: electroválvula, bomba de agua, ventilador.	Voltaje de alimentación 110V. Corriente hasta 10A.
Fuente de alimentación	Fuente de alimentación para los nodos.	Voltaje de salida 5Vdc-24Vdc.

Además del hardware previamente descrito, es necesario el uso de distintos softwares que permitan tratar los datos y enviar ordenes hacia los actuadores, los cuales se describen en la Tabla 15.

Tabla 15. Software para el sistema

	Descripción	Características
Software de programación	Entorno flexible que cumpla los requerimientos de los dispositivos a usar.	Libre de licencias.
Servidor	Almacena y gestiona los datos recopilados.	Sistema operativo abierto.
Base de datos	Información recopilada y almacenada, que sea fácil de usar.	Código abierto. Sistema personalizable.

3.1.3 Arquitectura del sistema

En la Figura 21 se muestra la arquitectura que se implementa en el sistema que está compuesto por 4 etapas, adquisición de datos, transmisión, procesamiento y visualización y control de actuadores, detallados a continuación:

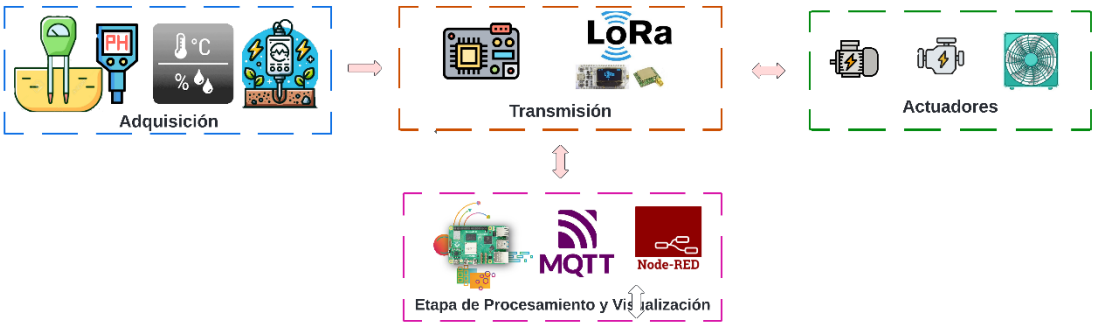


Figura 21. Arquitectura del sistema

a. Etapa 1: Adquisición de datos

Para obtener datos sobre las condiciones del suelo y el ambiente del invernadero, se despliegan nodos de sensores distribuidos estratégicamente en su interior. Estos nodos permiten la medición de pH, humedad y conductividad eléctrica del suelo, así como temperatura y humedad relativa en el ambiente. Cada sensor está conectado a un microcontrolador Heltec LoRa32, el cual se encarga exclusivamente de recolectar la información y transmitirla a una Gateway para su procesamiento y análisis.

b. Etapa 2: Transmisión de datos

La transmisión de los datos se los realizara mediante comunicación LoRa, todos los microcontroladores desplegados dentro del invernadero tiene comunicación LoRa lo cual facilitará el envió de los datos hacia un Gateway. El Gateway es el encargado de recibir los datos para su posterior análisis.

c. Etapa 3: Procesamiento y visualización

El servidor se encarga de recibir los datos desde el Gateway para transmitirlos hacia los dispositivos finales. Como servidor, se usa un microordenador Raspberry PI, el

cual tiene instalado Node-RED donde se procesan los datos para el control de actuadores y almacenamiento de datos en InfluxDB y para su visualización Grafana.

d. Etapa 4: control de actuadores

Los actuadores están controlados por un módulo Heltec LoRa32 que recibe las ordenes según lo haya analizado el servidor. Las ordenes son enviadas a través del Gateway hacia la red de actuadores para ejecutar las acciones correspondientes.

3.1.4 Selección de materiales y equipos

La selección de hardware y software se lleva a cabo mediante una revisión detallada de sus características más relevantes. A continuación, se eligen los componentes más adecuados para el sistema.

Después de realizar la Tabla 4 comparativa entre tres módulos LoRa presentada en el CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO, se optó por el módulo Wifi Lora Esp32 debido a que presenta cierta ventaja en la velocidad de datos, y dispone de varios pines GPIO a diferencia del resto, lo cual es indispensable para que el sistema sea escalable.

Después de realizar la Tabla 5 comparativa con los sensores de suelo presentada en el CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO, se optó por el sensor TDR-315L puesto que este permite medir las 3 variables mediante un solo dispositivo los cuales son: pH, humedad y conductividad y sus rangos de medida están dentro de lo requerido, además de eso es resistente al agua y la corrosión debido a su protección IP68.

Una vez hecha la Tabla 6 comparativa de los sensores de ambiente presentada en el CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO, se seleccionó el sensor DHT11 debido a que presenta una alta fiabilidad y es bastante estable gracias a su señal digital calibrada. Además, tiene un precio accesible.

En la Tabla 7, presentada en el CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO se realiza una comparación entre distintos microordenadores y se optó por usar la Raspberry Pi4, un buen rendimiento gracias a su procesador de cuatro núcleos y hasta 4GB de RAM. También tiene una gran comunidad de soporte y compatibilidad con diversos sistemas operativos.

En la Tabla 8 del CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO se presenta una comparativa entre distintos Gateway, y se optó por el HT-M02 Edge LoRa Gateway debido a que tiene una cobertura de amplio rango. Al tener una carcasa de aluminio, además de hacerlo resistente al agua y al polvo también ayuda con la disipación de calor. Es fácil de usarlo con cualquier servidor LoRaWAN.

Una vez hecha la Tabla 9 comparativa de Dashboards en el CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO, se optó por Grafana debido a que presenta un manejo de datos más intuitivo y permite manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real lo cual lo hace altamente escalable.

En la Tabla 10 comparativa se realiza un análisis entre distintas bases de datos y se optó por usar InfluxDB, puesto que se manejará datos en tiempo real y en grandes volúmenes y esta se utiliza para el almacenamiento de datos de series temporales en campos destinados a la monitorización.

3.1.5 Arquitectura funcional del sistema

Después de analizar las distintas opciones entre software y hardware a implementar en el sistema electrónico, en la Figura 22 se realiza la arquitectura funcional del sistema, que consta de tres bloques divididos en dispositivos, transmisión, procesamiento y visualización.

Dentro del bloque de dispositivos se tiene los sensores que son encargados de recolectar datos dentro del invernadero y los actuadores que serán encendidos en función de las mediciones realizadas.

En el bloque de transmisión se tiene los dispositivos Heltec LoRa32 y el Gateway HT-M02 que son encargados de procesar los datos recolectados por los sensores y enviar los mismos hacia el Gateway. Además, este dispositivo tendrá la función de conectarse con un servidor LoRaWAN para facilitar la extracción hacia un servidor local, posterior a esto el Gateway será encargado de enviar las órdenes a realizar hacia otro modulo Heltec LoRa32 para que esta encienda o apague los actuadores.

En el bloque de procesamiento y visualización se encuentra una Raspberry Pi donde se extraerán los datos desde The Things Network (TTN) mediante MQTT a través de Node-RED donde se procesan los datos para la toma de decisiones y para su posterior almacenamiento en la base de datos InfluxDB y finalmente se visualizan los datos de forma gráfica en Grafana.

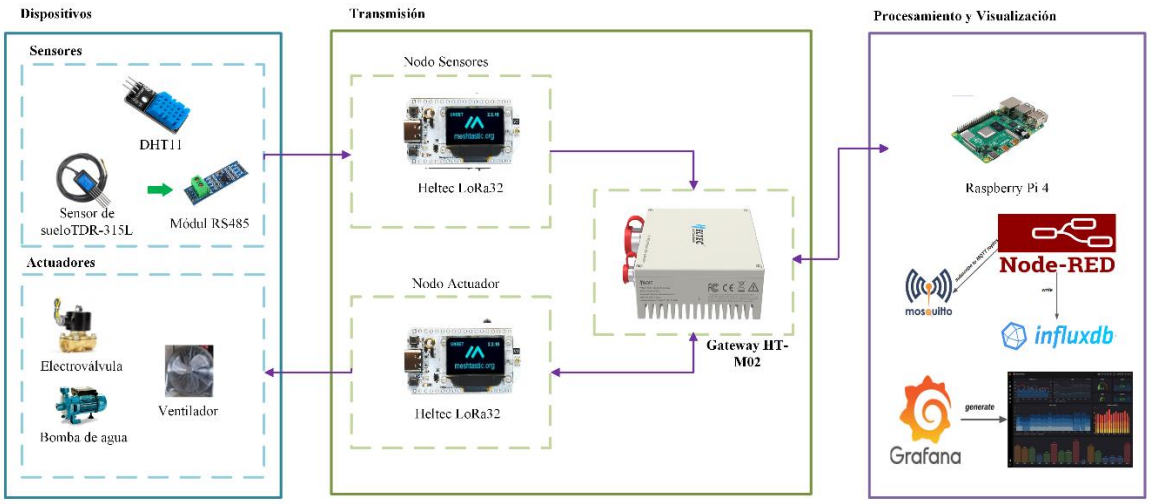


Figura 22. Arquitectura funcional del sistema

3.1.6 Configuración Protocolo LoRaWAN

a. Configuración del protocolo en el Gateway HT-M02

En la Figura 23 se observa la interfaz web del Gateway. Las credenciales para ingresar a la interfaz generalmente se encuentran en la parte posterior del dispositivo, donde, además de las características del dispositivo también se encuentra la IP, usuario y contraseña. El usuario para ingresar a este dispositivo es HT-M02 y su contraseña heltec.org. En la pestaña Gateway Setting se configura los parámetros necesarios para la conexión hacia TTN, donde encontramos el Gateway_ID, esta identificación es única en el mundo. Se Selecciona la frecuencia en la que se va a trabajar que es 915 MHz. La dirección del servidor depende de si el servidor LoRaWAN se implementa de manera local o en la nube. En este caso, se utilizó The Things Network, por lo que se configuró la dirección nam1.cloud.thethings.network. Los puertos Uplink y Donwlink son los que permiten la comunicación con el servidor de red. Cuando se habla de uplink quiere decir que los datos llegan desde distintos nodos hacia el Gateway, mientras que downlink quiere decir que los datos serán enviados desde el

Gateway hacia algún nodo LoRa. Una vez hecha las configuraciones del Gateway se aplican los cambios y se espera alrededor de 10 segundos hasta que aparezca en Status como RUNNING.



Figura 23. Interfaz Gateway HT-M02

Se puede verificar que los datos se están enviando desde el Gateway revisando el tráfico de datos los cuales se muestran como Payload, como se observa en la Figura 24.

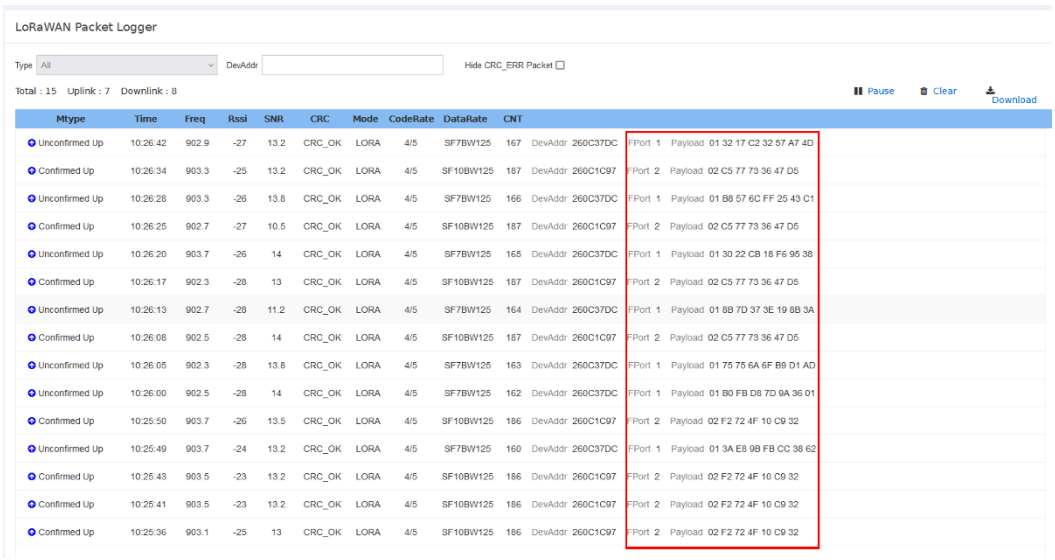


Figura 24. Tráfico de datos en el Gateway

b. The Things Network (TTN)

En la plataforma TTN se registra la Gateway mediante el Gateway_ID como se muestra en la Figura 25. Una vez completada este paso, es posible verificar su estado en línea (Figura 26), o que habilita la comunicación bidireccional para recibir y transmitir datos con los distintos nodos de la red.

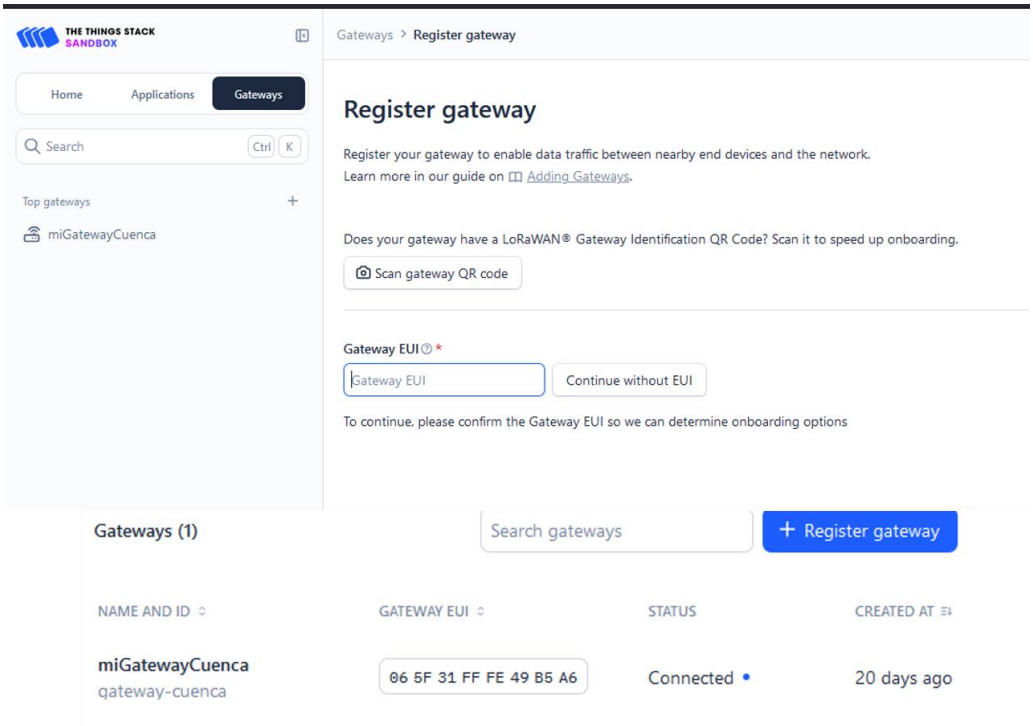


Figura 25. Registro del Gateway

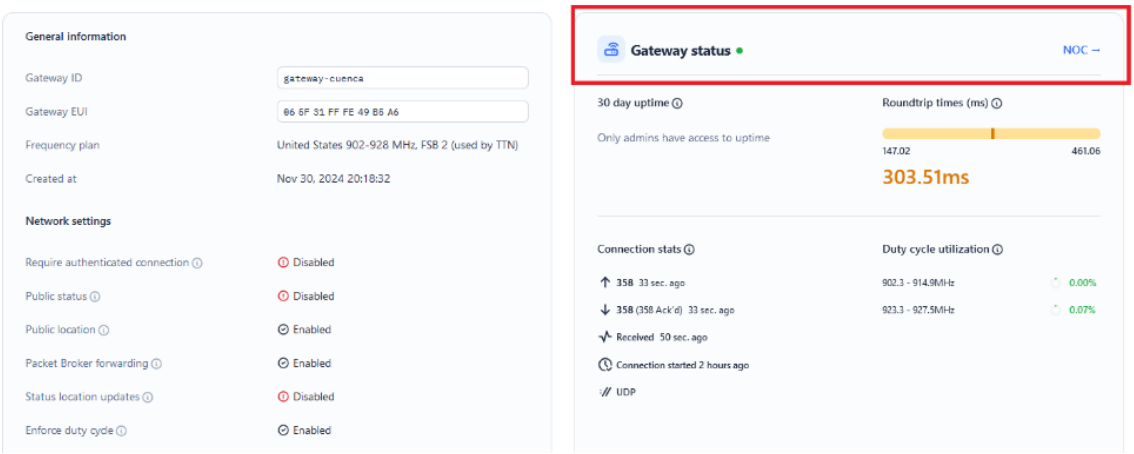


Figura 26. Estado del Gateway

Para tener un mejor manejo de recursos y dispositivos se debe crear organizaciones en The Things Network (TTN), en este caso se creó una organización llamada invernadero1 como se ve en la Figura 27.

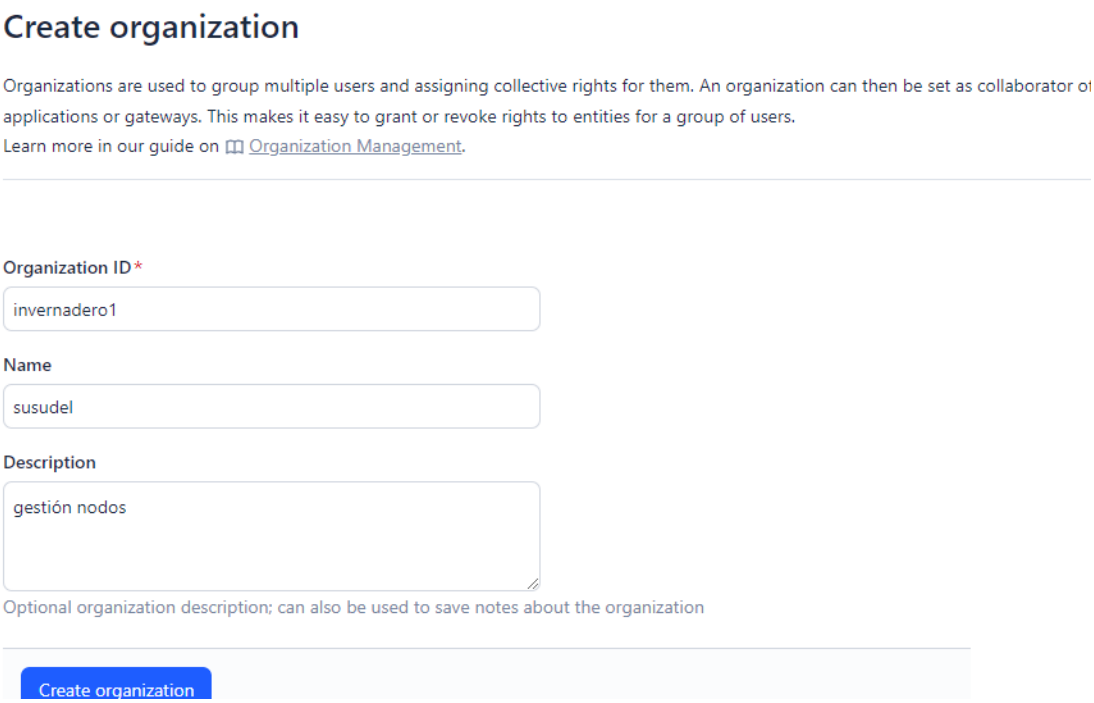


Figura 27. Creación de organización

Para que los dispositivos se comuniquen mediante The Things Network (TTN), es necesario registrar cada nodo siguiendo un protocolo específico. Como se observa en la Figura 28a, durante el registro se configura el plan de frecuencia (902-928 MHz) para cumplir con los estándares locales, se selecciona la versión de LoRaWAN 1.0.3 ya que es una versión estándar y ampliamente utilizada por su compatibilidad, y se definen las llaves de seguridad según el método de activación. En este caso, al emplear OTAA (Over-the-Air Activation), se asignan las credenciales JoinEUI, DevEUI, AppKey y el nombre del dispositivo. Este proceso se repite para cada nodo integrado al sistema. Una vez finalizado el registro, la Figura 28b muestra el listado de dispositivos en TTN, donde es posible verificar su estado de conexión: en línea (activos) o sin historial de conexión (nunca vinculados a la red), lo que permite monitorear su integración en tiempo real.

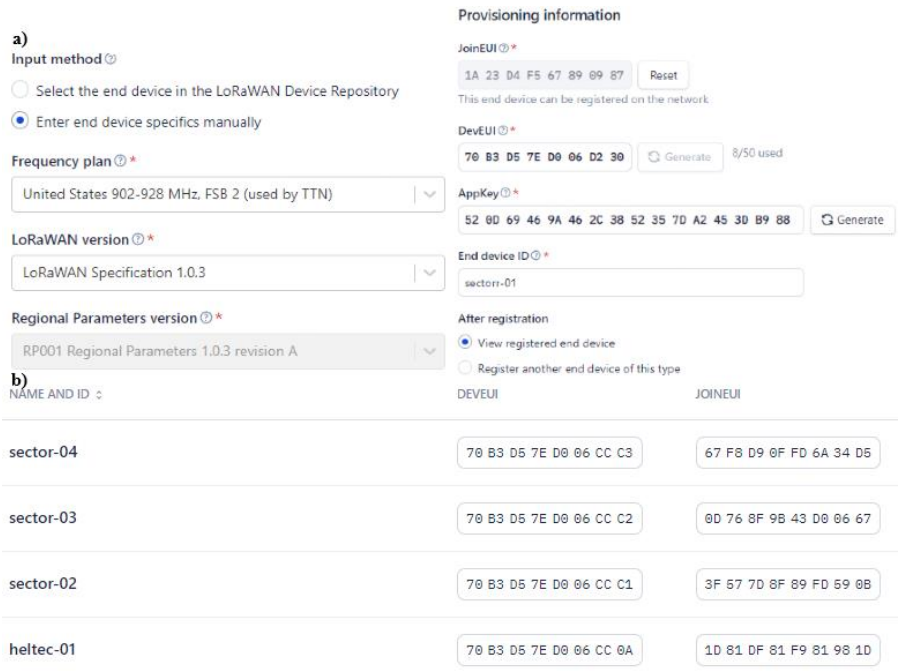


Figura 28. a) Registro de dispositivos, b) Dispositivos registrados

c. Programación del protocolo en el microcontrolador

La librería que permite trabajar con el protocolo LoRaWAN es LoRaWan_APP, permitiendo la aplicación de este protocolo y facilitando la comunicación entre servidores LoRaWAN y los nodos finales. Como método de activación se usa OTAA (Over-The-Air-Activation) en base a tres parámetros: devEui, appEui y el appKey.

El Device EUI (devEUI) es un identificador único global asignado a cada dispositivo LoRaWAN. Esta identificación permite que el servidor reconozca y diferencie cada nodo dentro de la red.

El Application EUI (appEUI) es un identificador que asocia el dispositivo con una aplicación específica dentro de la red LoRaWAN. Su función es garantizar que los datos enviados por el dispositivo sean dirigidos a la aplicación correcta en el servidor.

La Application Key (appKey) es una clave de seguridad utilizada para cifrar la comunicación entre el dispositivo y el servidor LoRaWAN. Esta clave se emplea en el proceso de autenticación OTAA para generar sesiones seguras, evitando accesos no autorizados y protegiendo la integridad de los datos transmitidos. Cada dispositivo debe contar con una appKey única para garantizar la seguridad de la red.

```
#include "LoRaWan_APP.h"

/* OTAA para*/
uint8_t devEui[] = { 0x70, 0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x06, 0x53, 0xC8 };
uint8_t appEui[] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
uint8_t appKey[] = { 0x74, 0xD6, 0x6E, 0x63, 0x45, 0x82, 0x48, 0x27, 0xFE, 0xC5, 0xB7, 0x70, 0xBA, 0x2B, 0x50, 0x45 };
```

Figura 29. Método de activación OTAA colocada en cada microcontrolador.

Para que los datos se transmitan hasta el servidor LoRaWAN, es necesario preparar la carga útil, lo cual requiere empaquetarlos en el campo appData (formato estructurado según el estándar LoRaWAN), como se muestra en la Figura 30.

```
113
114     appData[0] = (uint8_t) humedadSuelo;          // Humedad de suelo (1 byte)
115     appData[1] = (uint8_t)(ph * 10); // pH multiplicado por 10
116     appData[2] = (conductividad >> 8) & 0xFF;    // Conductividad (MSB)
117     appData[3] = conductividad & 0xFF;           // Conductividad (LSB)
118     appData[4] = (uint8_t) humedadAmbiente;      // Humedad ambiental (1 byte)
119     appData[5] = (int8_t) temperaturaAmbiente + 40; // Temperatura ambiental c
```

Figura 30. Empaquetado de datos

Una vez que la carga útil esta lista para ser transmitida, como se observa en la Figura 31, el bucle loop gestiona la comunicación entre el microcontrolador y el servidor LoRaWAN inicializando el dispositivo (DEVICE_STATE_INIT), posterior a esto intenta unirse a la red LoRaWAN (DEVICE_STATE_JOIN); una vez que la conexión haya sido exitosa procede a enviar los datos usando la función declarada anteriormente (prepareTxFrame), después calcula el tiempo de espera hasta el próximo envío según se haya configurado (DEVICE_STATE_CYCLE).

```
158 void loop() {
159   switch( deviceState ) {
160     case DEVICE_STATE_INIT:
161       LoRaWAN.init(loraWanClass, loraWanRegion);
162       LoRaWAN.setDefaultDR(3);
163       break;
164     case DEVICE_STATE_JOIN:
165       LoRaWAN.join();
166       break;
167     case DEVICE_STATE_SEND:
168       prepareTxFrame(appPort);
169       LoRaWAN.send();
170       deviceState = DEVICE_STATE_CYCLE;
171       break;
172     case DEVICE_STATE_CYCLE:
173       txDutyCycleTime = appTxDutyCycle + randr( -APP_TX_DUTYCYCLE_RND, APP_TX_DUTYCYCLE_RND );
174       LoRaWAN.cycle(txDutyCycleTime);
175       deviceState = DEVICE_STATE_SLEEP;
176       break;
177     case DEVICE_STATE_SLEEP:
178       LoRaWAN.sleep(loraWanClass);
179       break;
180     default:
181       deviceState = DEVICE_STATE_INIT;
182       break;
183   }
184 }
```

Figura 31. Gestión de comunicacion LoRaWAN

El nodo actuador debe tener la capacidad de recibir datos desde el servidor para controlar los actuadores, para esto, la Figura 32 muestra la función downLinkDataHandle que usa el objeto mcpsIndication, mediante este se puede imprimir el tamaño del buffer y los datos que vienen en este.

```
92  //downlink data handle function example
93  void downLinkDataHandle(McpsIndication_t *mcpsIndication)
94  {
95  Serial.printf("+REV DATA:%s,RXSIZE %d,PORT %d\r\n",mcpsIndication->RxSlot?"RXWIN2":"RXWIN1",mcpsIndication->BufferSize,mcpsIndication->Port);
96  Serial.print("+REV DATA:");
97  for(uint8_t i=0;i<mcpsIndication->BufferSize;i++)
98  {
99  | | Serial.printf("%02X",mcpsIndication->Buffer[i]);
100 }
101 Serial.println();
102 }
```

Figura 32. Función para recibir datos del servidor

La lógica que se usa para que el protocolo LoRaWAN pueda establecer comunicación con TTN se detalla el diagrama de flujo en la Figura 33.

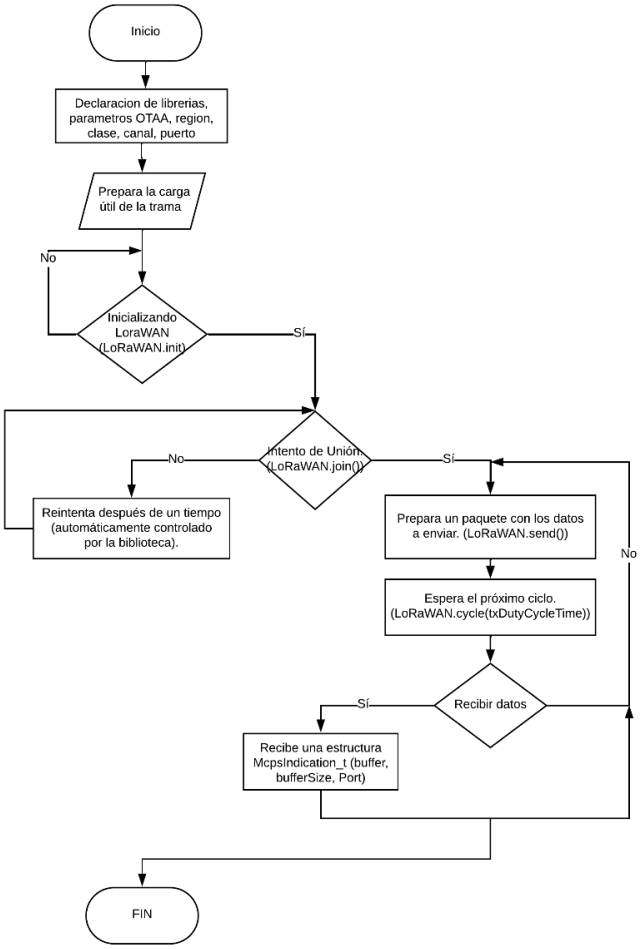


Figura 33. Diagrama de flujo de la comunicación del microcontrolador con el servidor LoRaWAN

d. Programación de sensores

Para comenzar con la programación de los sensores se agrega las librerías correspondientes para cada sensor, esto facilita su programación. Como se ve en la Figura 34 se agrega librerías para el sensor DHT11 y el sensor de suelo que trabaja con una comunicación RS-485.

```
1   #include "LoRaWan_APP.h"
2   #include <Adafruit_Sensor.h>
3   #include <DHT.h>
4   #include <DHT_U.h>
5   #include <Wire.h>
6   #include <HardwareSerial.h>
```

Figura 34. Librerias de sensrores

En la función readModbusSensors() se comunica el sensor mediante el protocolo Modbus a través de la interfazRS-485 para lectura de los valores de humedad, pH y conductividad, como se muestra en la Figura 35. Una vez que lo datos hayan sido leídos correctamente están listos para ser empaquetados para su posterior envió hacia el Gateway.

```
67  void readModbusSensors() {
68    RS485.write(modbusRequest, sizeof(modbusRequest));
69    RS485.flush();
70    delay(200);
71
72    int len = RS485.available();
73    if (len >= 11) {
74      RS485.readBytes(response, len);
75
76      uint16_t humedadRaw = (response[3] << 8) | response[4];
77      uint16_t conductividadRaw = (response[7] << 8) | response[8];
78      uint16_t phRaw = (response[9] << 8) | response[10];
79
80      humedadSuelo = humedadRaw / 10.0;          // Humedad en %
81      conductividad = conductividadRaw;          // Conductividad en µS/cm
82      ph = phRaw / 10.0;                         // pH
83    } else {
84      humedadSuelo = 0;
85      conductividad = 0;
86      ph = 0;
87    }
88  }
```

Figura 35. Función para leer sensor de suelo

3.1.7 Configuración del servidor

En el microcomputador Raspberry Pi 4B se instala el sistema operativo Ubuntu, mosquito, Node-Red, InfluxDB y Grafana. Los datos llegan hasta el servidor mediante el protocolo MQTT que se lo programa en Node-Red.

a. Programación en Node-Red

Antes de programar en Node-RED es necesario crear un servidor MQTT en TTN. Como se muestra la Figura 36 se tiene la dirección pública, el username y password.

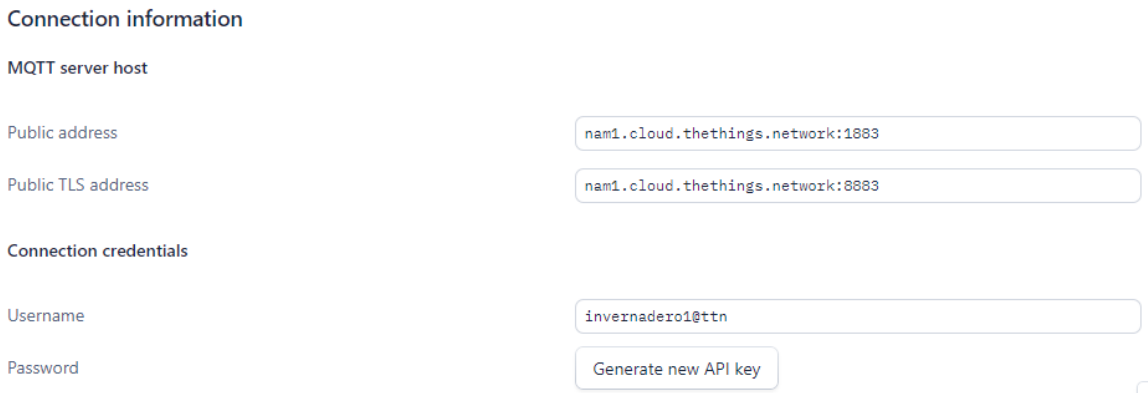


Figura 36. Servidor MQTT

En Node-Red se coloca un nodo MQTT IN, al cual se le configuró el servidor como se muestra en la Figura 37. En la pestaña de conexión se coloca la dirección pública asignada por el servidor MQTT de TTN, mientras que en la pestaña de seguridad se coloca el usuario y contraseña asignada.

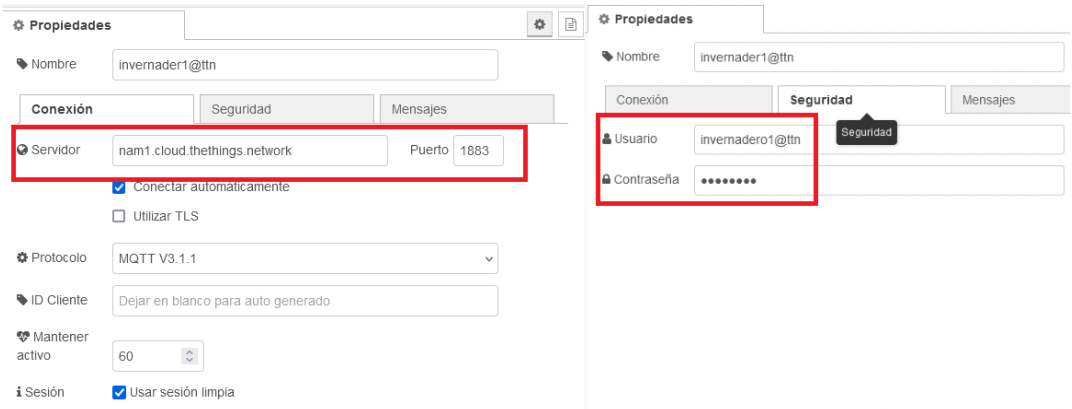


Figura 37. servidor MQTT en Node-Red

Una vez que fue configurado el servidor, en el nodo MQTT se coloca el tema v3/invernadero1@ttn/device/+/up según el servidor MQTT en TTN, como se muestra en la Figura 38.

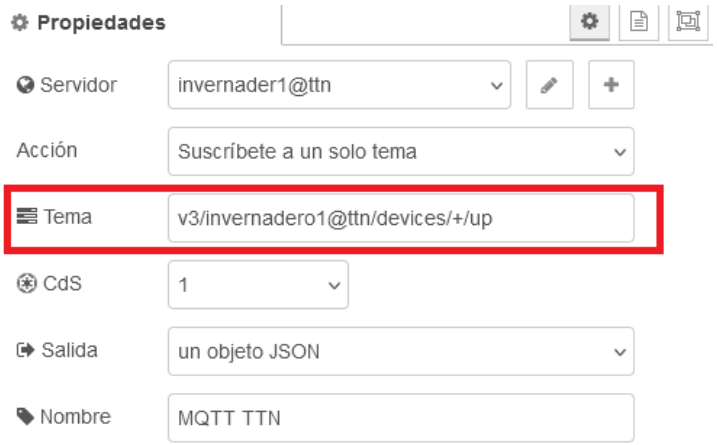


Figura 38. Nodo mosquito MQTT IN (Node-Red)

Debido a que se trabajó con varios dispositivos Heltec LoRa32 V3, para separar los datos de cada dispositivo se usó un nodo switch en Node-Red. Esto permitirá diferenciar los datos de cada dispositivo según se lo haya registrado en el servidor LoRaWAN como muestra la Figura 39.

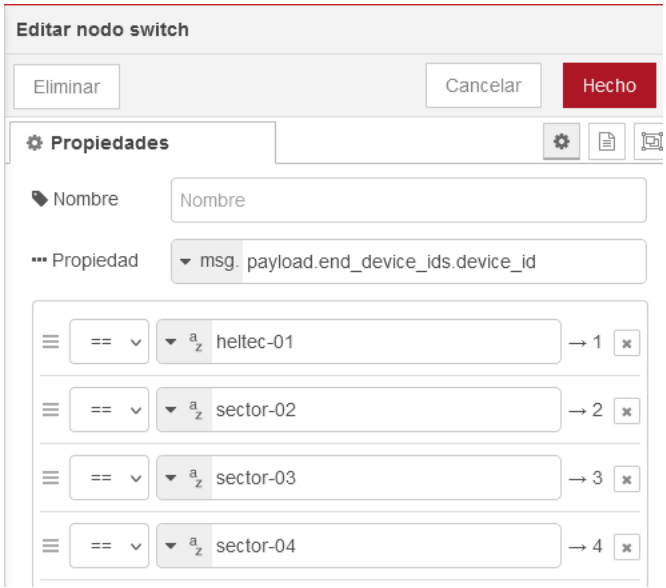


Figura 39. Configuración nodo switch

A la salida del nodo switch se coloca funciones que permitirán adquirir los datos de cada dispositivo, como identificador de cada función, se coloca las variables medidas

por los sensores para tener un mejor manejo de estas como se muestra en la Figura 40. No obstante, estos identificadores de las funciones tienen el mismo nombre que las variables utilizadas en el microcontrolador. Debido a que se tiene cinco funciones, y cada una será encargada de extraer las variables medidas que recibe el servidor LoRaWAN desde los microcontroladores, se programa en cada función según la Figura 41, cambiando el valor de la variable "variableSeleccionada" según el formato json recibido.

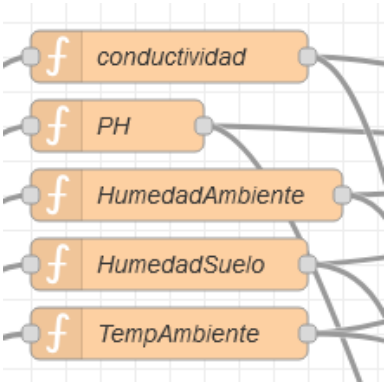


Figura 40. Funciones a la salida del switch

```
1
2   // Variable que deseas extraer
3   let variableSeleccionada = "temperaturaAmbiente"; // Cambia esto a la variable que quieres obtener
4
5   // Verifica si decoded_payload existe en uplink_message
6   if (msg.payload.hasOwnProperty("uplink_message") &&
7       msg.payload.uplink_message.hasOwnProperty("decoded_payload") &&
8       msg.payload.uplink_message.decoded_payload.hasOwnProperty(variableSeleccionada)) {
9
10      msg.topic = "heltec-01";
11
12      // Extrae el valor de la variable seleccionada
13      msg.payload = {
14          variable: variableSeleccionada,
15          valor_Temperatura_Ambiente: msg.payload.uplink_message.decoded_payload[variableSeleccionada]
16      };
17  } else {
18      // Mensaje de error si no se encuentra la variable
19      msg.payload = {
20          error: `Variable '${variableSeleccionada}' no encontrada en decoded_payload`
21      };
22  }
23
24  return msg;
```

Figura 41. Código de extracción de variables medidas

Una vez extraídos los datos se procede hacer un promedio con los valores de los 3 dispositivos para tomar decisiones en base a estas, pero antes es necesario el uso de un nodo join, el cual permite agrupar diferentes funciones para un posterior proceso de los datos. Como se muestra la Figura 42, se debe escoger el modo manual, el cual

despliega las opciones que permite combinar cada variable medida según el nombre del payload colocado en la Figura 41, para esto, se debe poner el numero según la cantidad de funciones que se vaya a agrupar, en este caso se agrupó 3. Este proceso se realiza para cada una de las variables medidas.

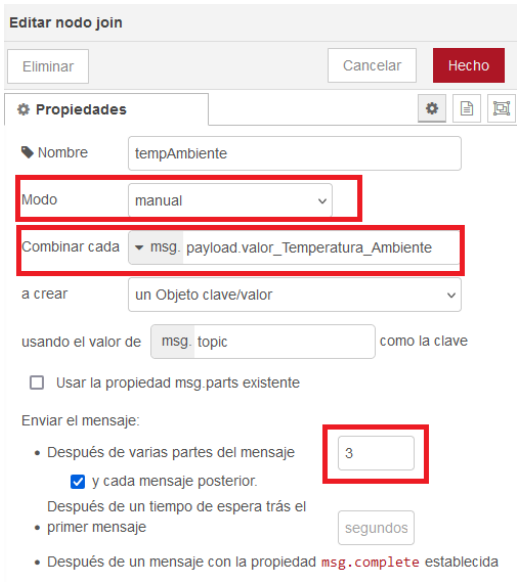


Figura 42. Configuración nodo join

Después de agrupar los datos, en la salida del nodo join se coloca una función que procesa la información y calcula el promedio, lo que permite tomar decisiones en los actuadores según sea los umbrales adecuados. Adicional a esto, se crea un payload que permite enviar el promedio hasta una base de datos para su almacenamiento, en este caso, dicho payload se llama “promedioTemp” como se muestra en la Figura 43.

```
// Extrae los valores de temperatura de los nodos
let temperaturas = msg.payload.valor_Temperatura_Ambiente || {};
let temp2 = temperaturas["sector-02"] || 0;
let temp3 = temperaturas["sector-03"] || 0;
let temp1 = temperaturas["heltec-01"] || 0;

// Calcula el promedio
let promedioTemp = (temp1 + temp2 + temp3) / 3;

// Umbrales para activar actuadores
let umbralAlta = 40; // Temperatura alta
let umbralBaja = 20; // Temperatura baja

msg.topic = "promedioTemperatura";

msg.payload = {
    ventilador: promedioTemp > umbralAlta ? 1 : promedioTemp < umbralBaja ? 0 : null,
    promedioTemp: promedioTemp
};

return msg;
```

Figura 43. Código para extraer los valores agrupados

Para poder enviar los datos hasta el dispositivo que controla los actuadores estos deben ser empaquetados, pero antes se debe agrupar los datos promediados de las variables medidas usando un nodo join como se muestra en la Figura 44.

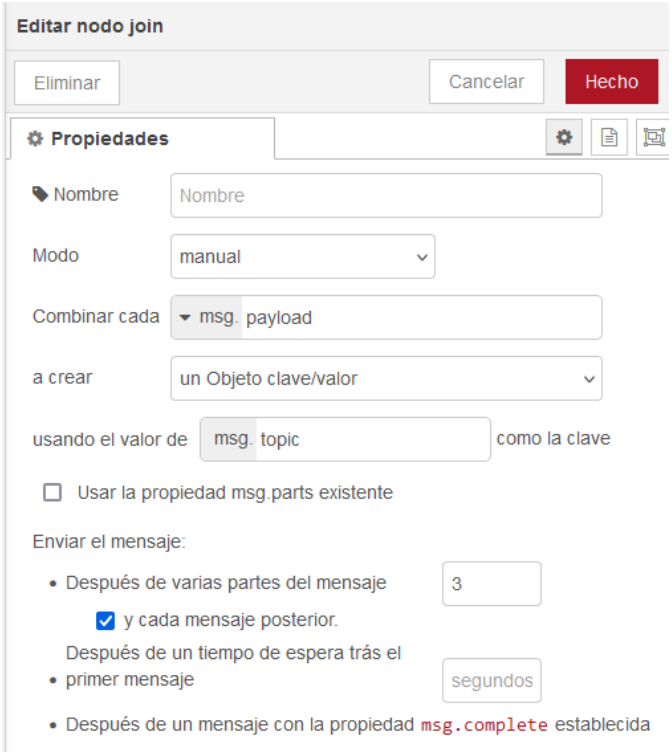


Figura 44. Nodo join para agrupar los promedios

A la salida del nodo join que agrupa los promedios, se coloca una función que permite acceder a las propiedades del nodo para extraer los valores específicos promediados de cada variable. Se crea arrays codificados en base64 para su transmisión hacia TTN. Para crear una lista de downlinks se debe especificar el puerto del dispositivo final, y los datos en formato base64, como se observa en la Figura 45.

Para que los datos procesados en Node-Red puedan salir hasta el dispositivo final se debe colocar un nodo MQTT OUT, en este nodo se configura el mismo servidor que se puso en el nodo MQTT IN, y adicional a esto se coloca como tema v3/invernadero1@ttn/devices/sector-04/down/replace, según la Figura 46. Cabe recalcar que es necesario colocar replace para que los datos sean enviados al dispositivo final desde TTN, puesto que también existe la opción push que solo pone en cola en TTN a todos los datos enviados desde Node-Red.

```
// Accede a las propiedades dentro del objeto recibido del nodo Join
let promedioHumedadRelativa = msg.payload.promedioHumedadRelativa || {};
let promedioHumedadSuelo = msg.payload.promedioHumedadSuelo || {};
let promedioTemperatura = msg.payload.promedioTemperatura || {};

// Extrae los valores específicos de cada clave
let electrovalvula2 = promedioHumedadRelativa.electrovalvula2 || 0; // Electroválvula 2
let electrovalvula1 = promedioHumedadSuelo.electrovalvula1 || 0;   // Electroválvula 1
let ventilador = promedioTemperatura.ventilador || 0;              // Ventilador

// Crear el payload como array de bytes
let payloadArray = [
    ventilador ||0,
    electrovalvula1 ||0 ,
    electrovalvula2 ||0
];

// Convertir el array a Base64 para TTN
let frm_payload = Buffer.from(payloadArray).toString('base64');

node.warn(`Array en binario: ${payloadArray}`);
node.warn(`Payload en Base64: ${frm_payload}`);

msg.payload = {
    downlinks: [
        {
            f_port: 4,               // Puerto del actuador
            frm_payload: frm_payload, // Payload codificado en Base64
            priority: "NORMAL"
        }
    ]
};
// Agrega la configuración para reemplazar la cola
msg.options = { replace: true };
node.warn(`Payload enviado: ${JSON.stringify(msg.payload)}`);
msg.topic = "v3/invernadero1@ttn/devices/sector-04/down/push";
return msg;
```

Figura 45. Código para procesar los datos y generar downlinks

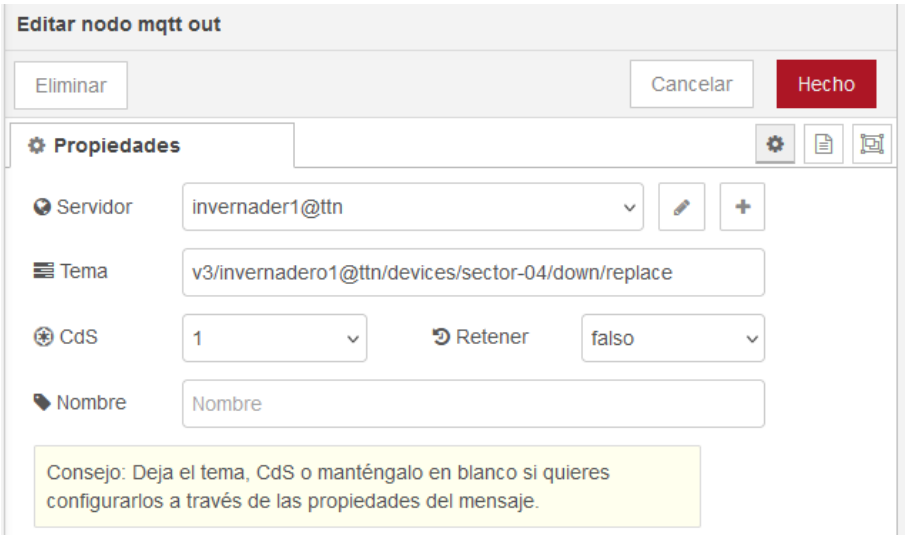


Figura 46. Configuración del nodo MQTT OUT

Para que los valores puedan ser guardados en la base de datos se coloca un nodo InfluxDB OUT. En el servidor se coloca la IP de la Raspberry, el Bucket va según se haya creado en InfluxDB y en Medición se define como aparecerá en la base de datos

según muestra en la Figura 47. Este proceso se lo realiza para cada función que procesa datos y lo queramos guardar en InfluxDB.

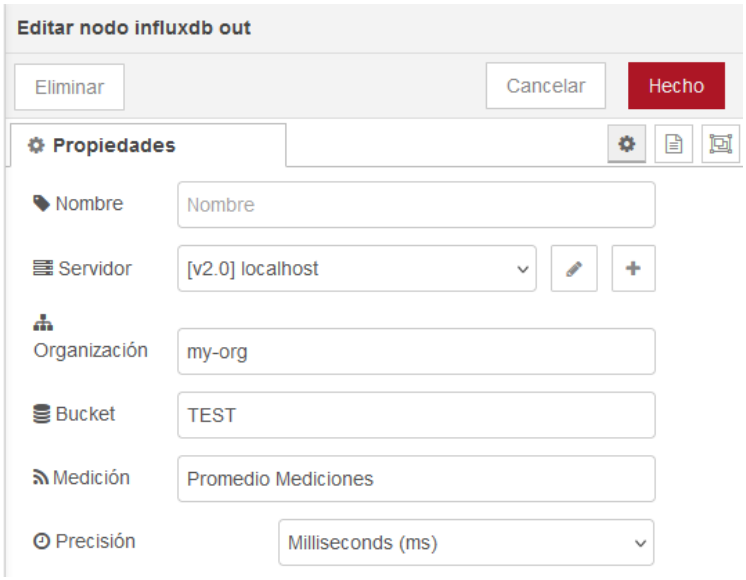


Figura 47. Nodo InfluxDB OUT

En la Figura 48 se observa el esquema completo de la programación gráfica en Node-Red.

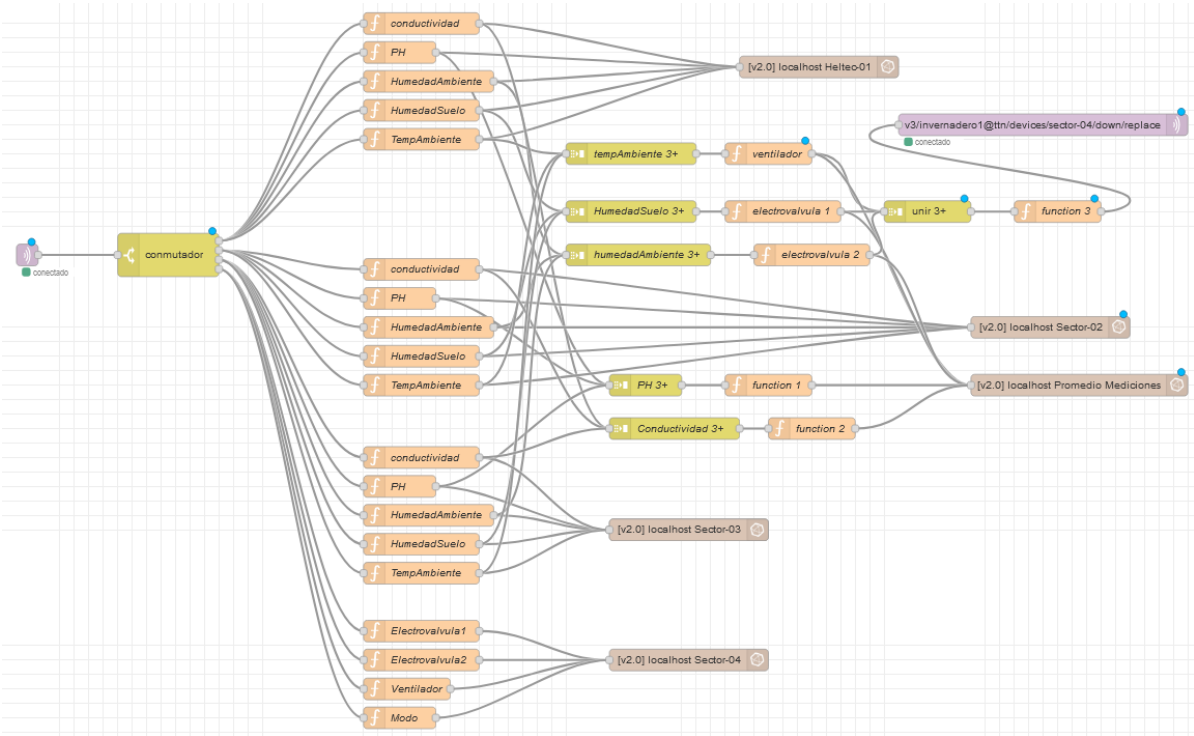


Figura 48. Programación gráfica final en Node-Red

b. Configuración de InfluxDB y Grafana

- ***Configuración en InfluxDB***

En InfluxDB se crea un Bucket con el mismo nombre que se colocó en la Figura 47, como se muestra en la Figura 49 ya se tiene creado el Bucket, en caso de no tenerlo solo se selecciona Create Bucket y se coloca un nombre que lo identifique.

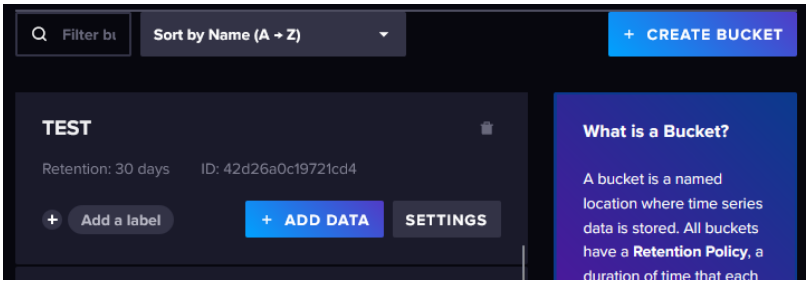


Figura 49. Bucket en InfluxDB

Puesto que en la Figura 47 en la sección medición ya se había colocado “Promedio Mediciones”, se creó de manera automática en la base de datos con sus respectivas variables medidas (Figura 50a). Para que en el Dashboard se pueda observar de manera gráfica los valores medidos actuales se debe colocar como LAST, una vez hecho eso, en la sección SCRIPT EDITOR se encuentra un código que se lo coloca en Grafana (Figura 50b). Este proceso se lo debe hacer para cada una de las variables medidas.

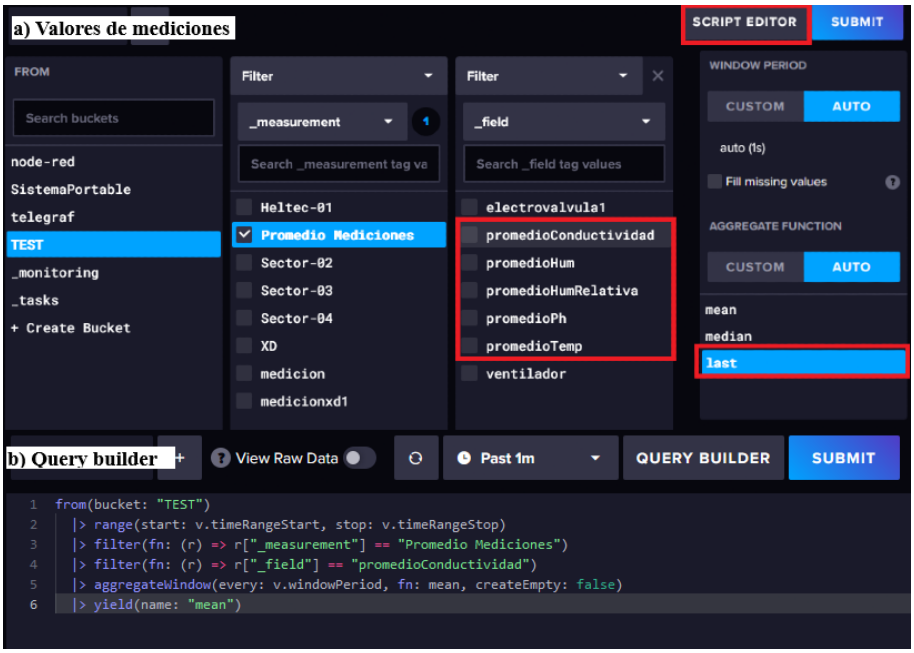


Figura 50. a) Valores medidos, b) query Builder

La Figura 51 describe el esquema general de la base de datos aplicada en el sistema, donde se encuentra el Bucket, los identificadores de cada valor a guardar, los datos medidos por los sensores y por último la estampa de tiempo que realizó la medición.

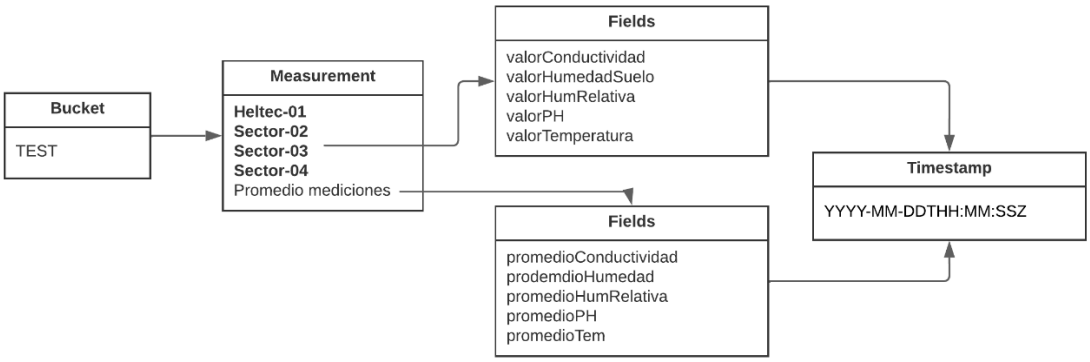


Figura 51. Esquema general de la base de datos

- ***Configuración en Grafana***

En Grafana para que la interfaz se indexe con la base de datos se creó un Data Source y se seleccionó InfluxDB, donde se coloca el URL del servidor, organización, token y el nombre del Bucket como se muestra en la Figura 52. El token que se coloca es el que InfluxDB asigna al momento de ingresar por primera vez a la base de datos. Sin embargo, es posible generar otro token para estos fines.

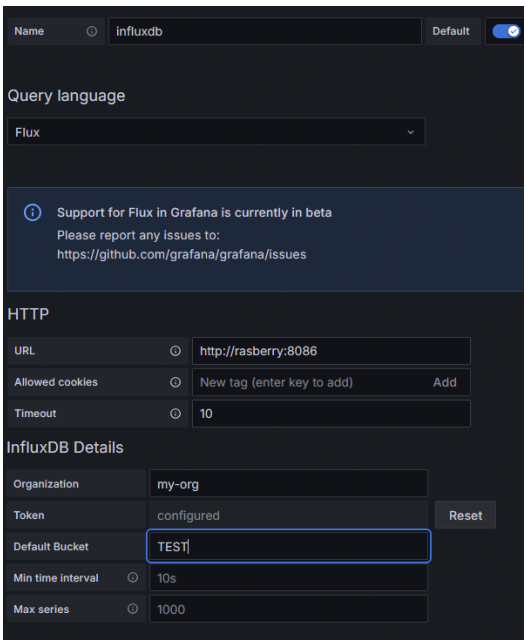


Figura 52. Data source Influxdb en Grafana

Una vez creada la Data Source ya se puede diseñar la interfaz, se tiene la opción de elegir varios tipos de visualización, puesto que se necesita ver el valor medido en tiempo real se eligió Gauge, en la parte inferior de la Figura 53, agregamos las líneas de código mencionadas que encontramos en nuestro InfluxDB según la Figura 50b. En el caso que queramos ver las mediciones históricas según el tiempo que el usuario elija en la Figura 50a, se debe seleccionar MEAN en vez de LAST, y a su vez en Grafana seleccionar el tipo de visualización Time Series. Este proceso se debe realizar para cada una de las variables medidas.

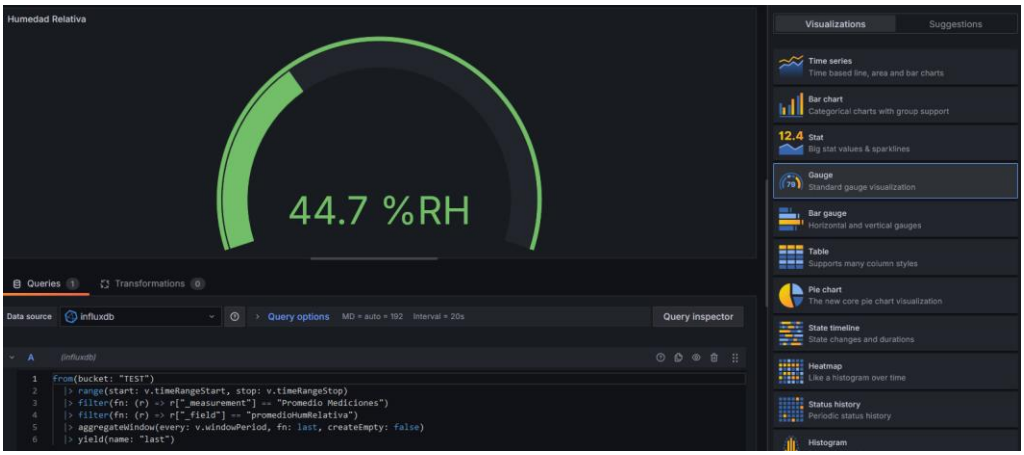


Figura 53. Valor en tiempo real en Grafana

- ***Configuración de alertas en Grafana***

Grafana permite crear alertas mediante Telegram o correo electrónico, en este caso se crea una alerta vía Telegram donde se puede configurar los valores que consideremos sean excesivos y se envíe una alerta indicando dicha situación, de la misma manera se nos informara si los valores medidos llegan a su normalidad.

En la parte izquierda de Grafana se encuentra la pestaña Alerting donde encontraremos las reglas de alerta, como se muestra en la Figura 54 se crea una nueva regla agregando el nombre de la alerta y con las líneas de código que se colocó en la Figura 53. Además, se coloca el nombre de la entrada y el valor que nosotros consideremos como excesivo, si llega a ese valor, automáticamente se enviara un mensaje vía Telegram dando el aviso.

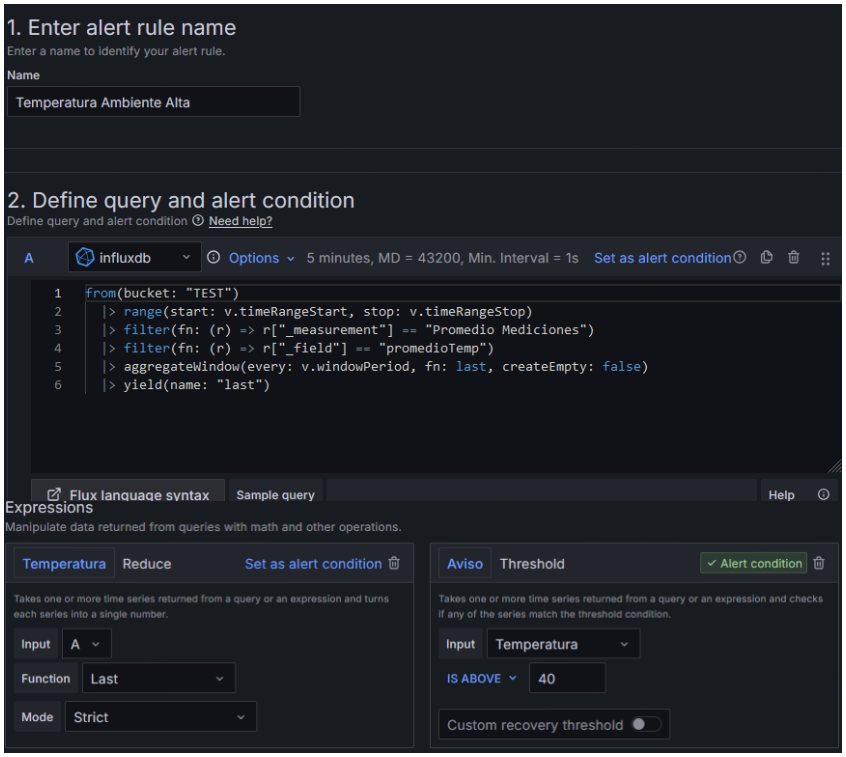


Figura 54. Nombre y condición de la alerta

Se crea también una carpeta con el nombre Test Alert y un grupo Test Group, esto permitirá tener de manera organizada la interfaz. Además, se coloca en 10 segundos el periodo pendiente, esto indica que antes de enviar el aviso esperara el tiempo que se haya configurado, como se observa en la Figura 55.

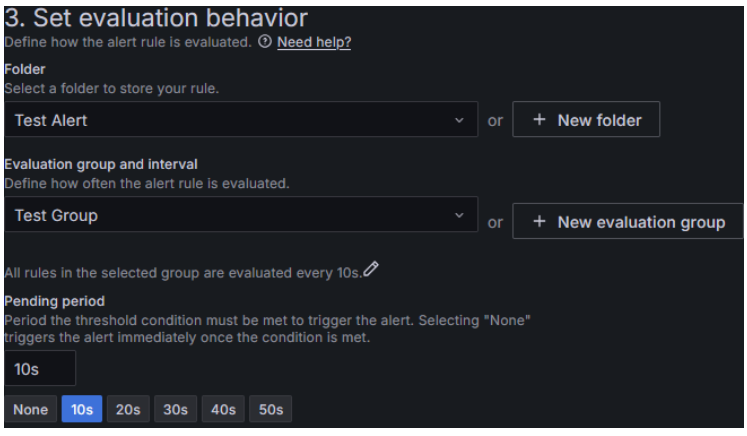


Figura 55. Comportamiento de evaluación

Por último, se selecciona el método de cómo se enviarán la notificación y el Contact Point, como muestra la Figura 56. Este Contact Point tendrá configurado el ID del Bot y el Chat ID de Telegram.

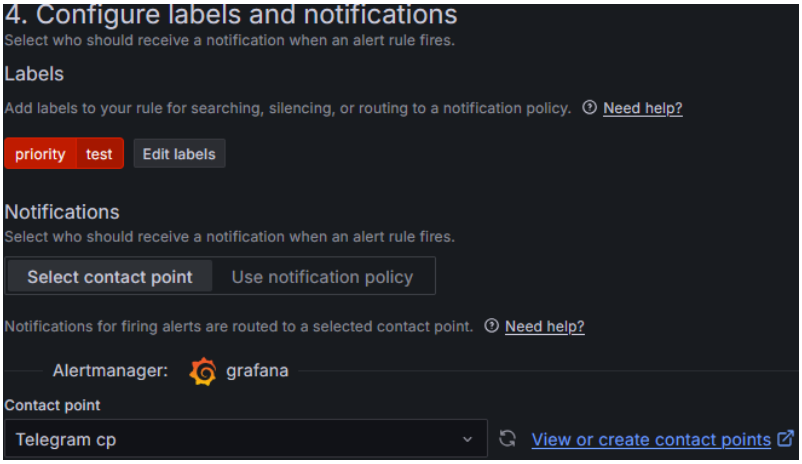


Figura 56. Configuración de envío de notificaciones

Antes de crear el Contact Point se debe crear un Bot en Telegram. En el buscador en Telegram se coloca BotFather, una vez en el chat se coloca según la Figura 57.

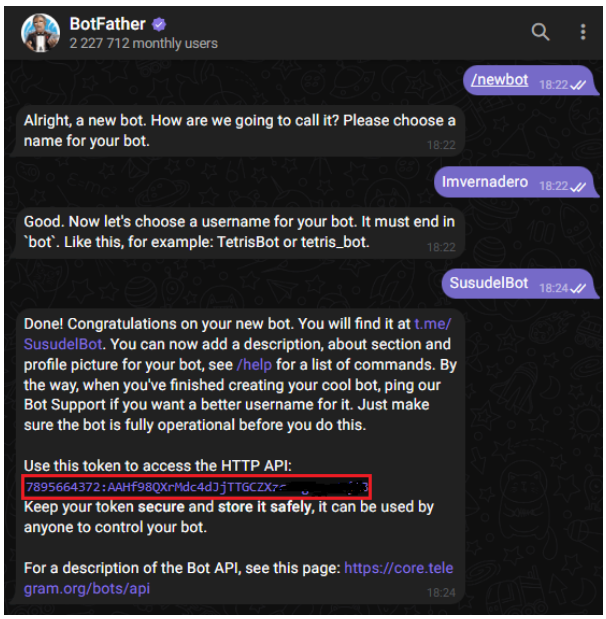


Figura 57. Creación de bot

Una vez creado el Bot, ya se puede crear el Contac Point, como se muestra en la Figura 58, se coloca en nombre, la integración, el Bot API Token que genera Telegram en la Figura 57 y el Chat ID, esto asegura que los avisos se envíen al usuario correcto.

La Figura 59 muestra la alerta enviada desde Grafana hasta Telegram, indicando que la temperatura ambiente está por arriba del umbral ideal, de la misma manera en el segundo mensaje da aviso que este problema ha sido resuelto.

En caso de que se pierda conexión con algún nodo, de igual manera dará un aviso indicando que no está recibiendo datos, como muestra la Figura 60, se tiene un mensaje indicando que no está recibiendo datos, y una vez que el problema haya sido resuelto, envía otro mensaje indicando como estado resuelto.

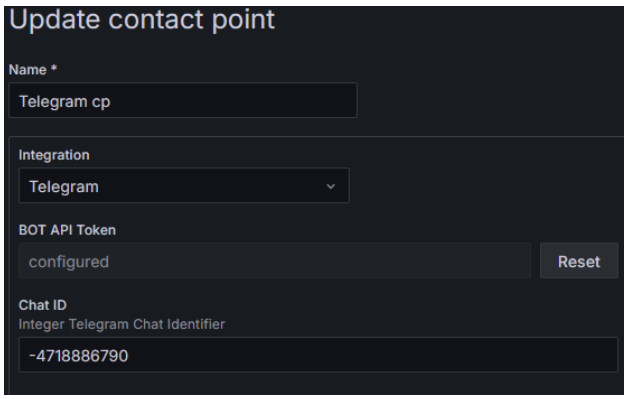


Figura 58. Creación de Contact Point

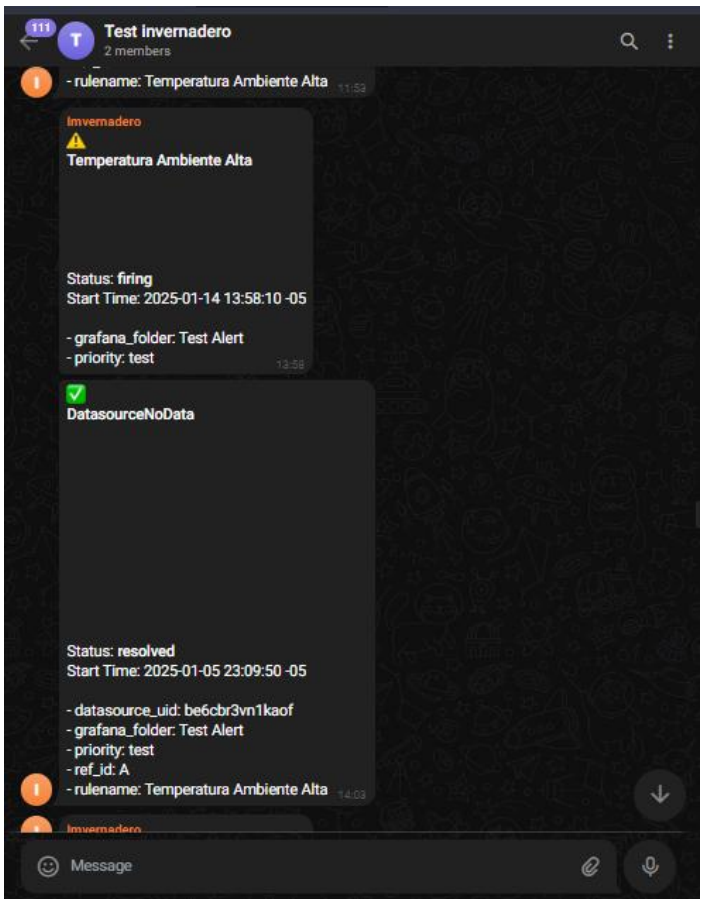


Figura 59. Alertas de umbral alto/bajo

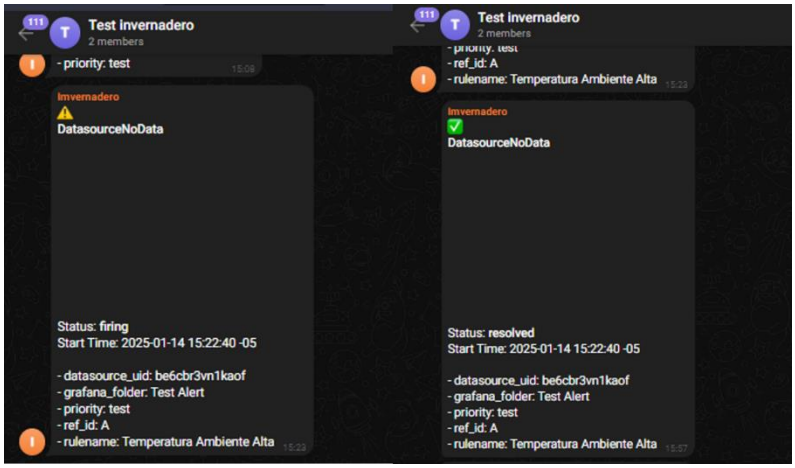


Figura 60. Alerta por perder conexión con nodos

3.1.8 Implementación de la Etapa de Monitoreo y Control

En esta etapa se describe como está conformado el sistema de adquisición de datos y control, enfocándose en el hardware necesario que permita medir las variables ambientales y del suelo en el invernadero.

a. Diseño del circuito electrónico

- ***Nodo sensores***

Para esta etapa se usa un módulo Heltec LoRa32 V3 a 915MHz como se muestra en la Figura 61, que procesa los datos recolectados por los sensores y transmite al Gateway. Adicionalmente, se integra un switch que permite realizar un reinicio del módulo en caso de ser necesario.

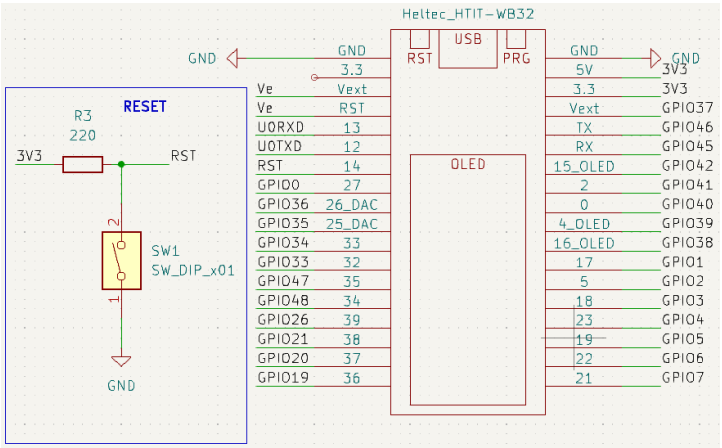


Figura 61. Heltec LoRa32

Para la adquisición de datos del sensor de suelo se usa el módulo conversor TTL a RS485 HW-519 como se muestra en la Figura 62.

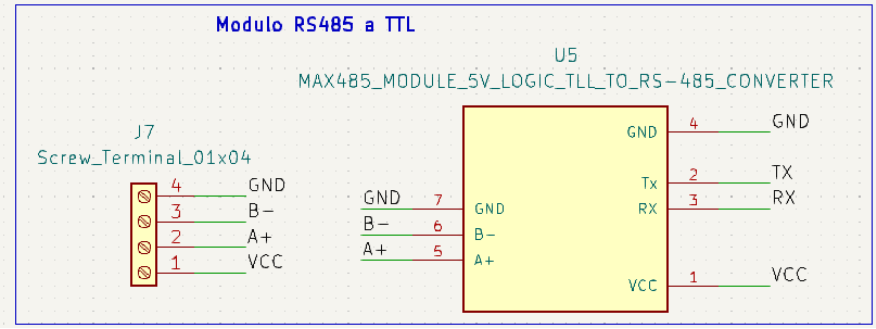


Figura 62. Modulo TTL a RS485

Se coloca también un circuito de acondicionamiento para controlar la temperatura, se usó un sensor DHT11 como se muestra en la Figura 63, el cual consta de un amplificador operacional LM358, un diodo 1N4728 y un potenciómetro de 100KΩ. Una vez que la señal haya sido acondicionada se envía al microcontrolador Heltec LoRa32 V3 para el procesamiento de datos.

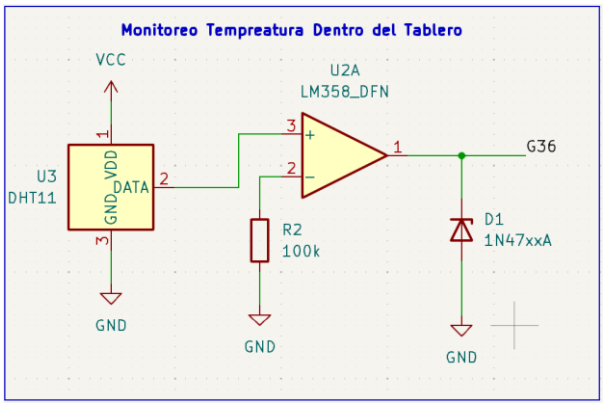


Figura 63. Circuito de acondicionamiento para el DHT11

- ***Nodos actuadores***

El módulo Heltec es el encargado de recibir las ordenes desde el Gateway para activar o desactivar los actuadores. Al igual que en el nodo de sensores (Figura 61) se incorpora un switch conectado al pin Reset del microcontrolador Heltec para que el usuario del sistema pueda reiniciar el módulo en caso de ser necesario.

Para el control de los actuadores se usó un módulo relé de 8 canales (Figura 64), este trabaja con 5V y permite controlar el encendido y apagado de equipos de alta potencia.

Tiene la capacidad de manejar cargas de hasta 250V/10A, ideal para controlar bombas de agua, electroválvulas y ventiladores. Para que sea fácil de conectar a la PCB se diseñó un bloque de 10 terminales, de esos 10 terminales 2 son para alimentar el módulo.

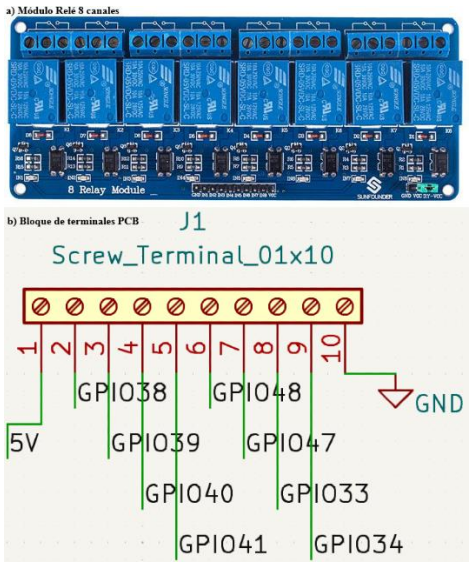


Figura 64. Módulo relé 8 canales y Bloque de terminales

Se colocó también borneras que permite conectar selectores ya sea para elegir el modo de control automático/manual y controlar los diferentes actuadores como se ve en la Figura 65.

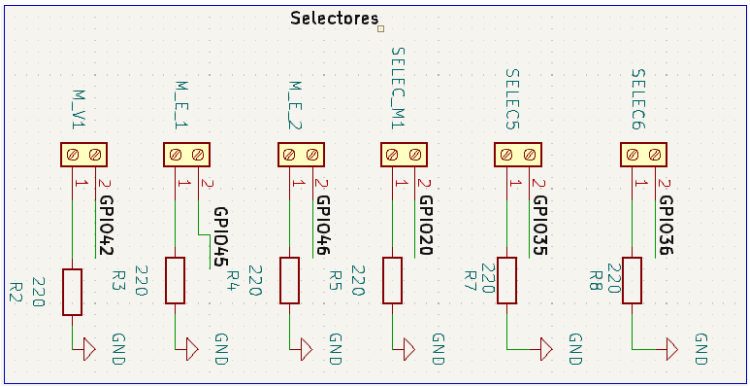


Figura 65. Selectores para control manual

b. Diseño del PCB

Para el diseño de las PCB del sistema electrónico se realiza dos placas, una para los nodos de los sensores y otra para los nodos de los actuadores. Como se muestra en la

Figura 66, Figura 67, se observa el circuito electrónico y su respectiva PCB el cual permite conectar los sensores para la adquisición de datos.

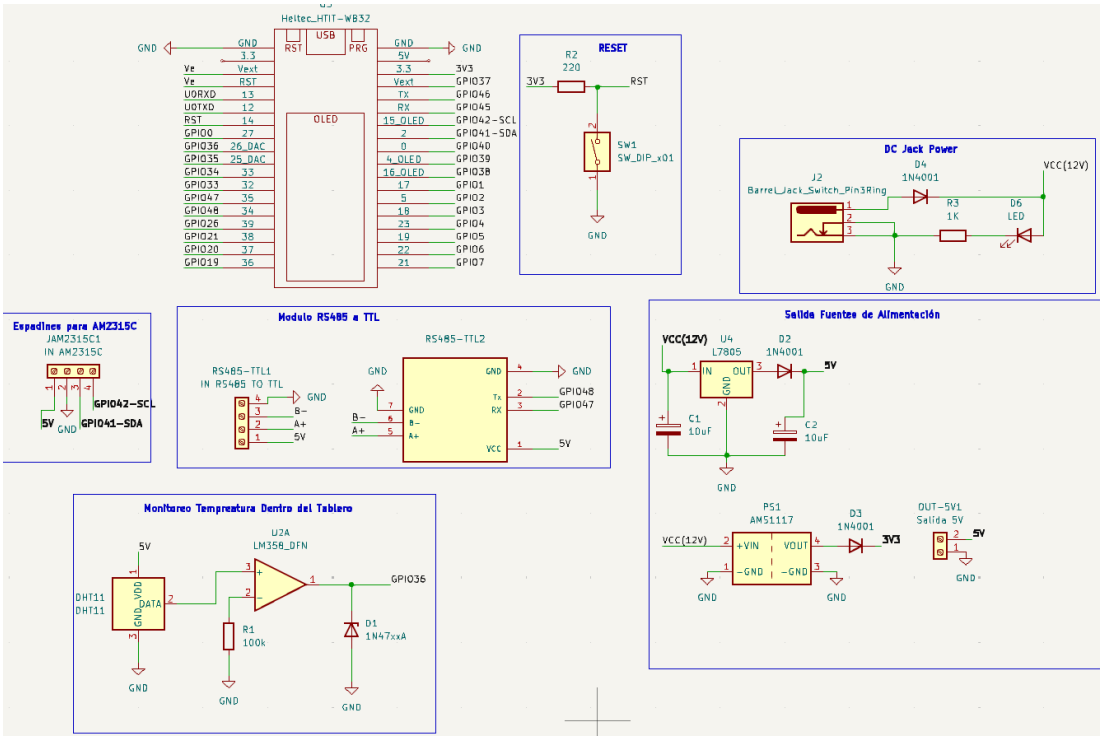


Figura 66. Circuito del nodo sensor

En la Figura 68, Figura 69 se observa el circuito electrónico y diseño PCB. Mediante esta placa PCB se realizó las conexiones de los respectivos actuadores para mantener en óptimas condiciones ambientales el interior del invernadero.

Una vez diseñada la PCB se procedió a la fabricación mediante el método de planchado, donde el circuito impreso es transferido térmicamente sobre la baquelita. En la Figura 70 se observa el proceso de transferencia térmica finalizado.

En la Figura 71 se muestra las baquelitas después de haber pasado por el baño ácido. Además, se tiene una baquelita después de haber sido aplicada una máscara UV, para este proceso se coloca una máscara UV de manera uniforme haciendo uso de láminas de acetato, es necesario tener impreso los pines de todos los componentes usados en la PCB, debido a que se coloca sobre la placa antes de llevarlo a la insoladora.

Una vez pasado todos los procesos anteriores se procedió a soldar cada uno de los componentes en la placa. En la Figura 72 se muestra los sócalos que ayudan a colocar fácilmente los componentes electrónicos.

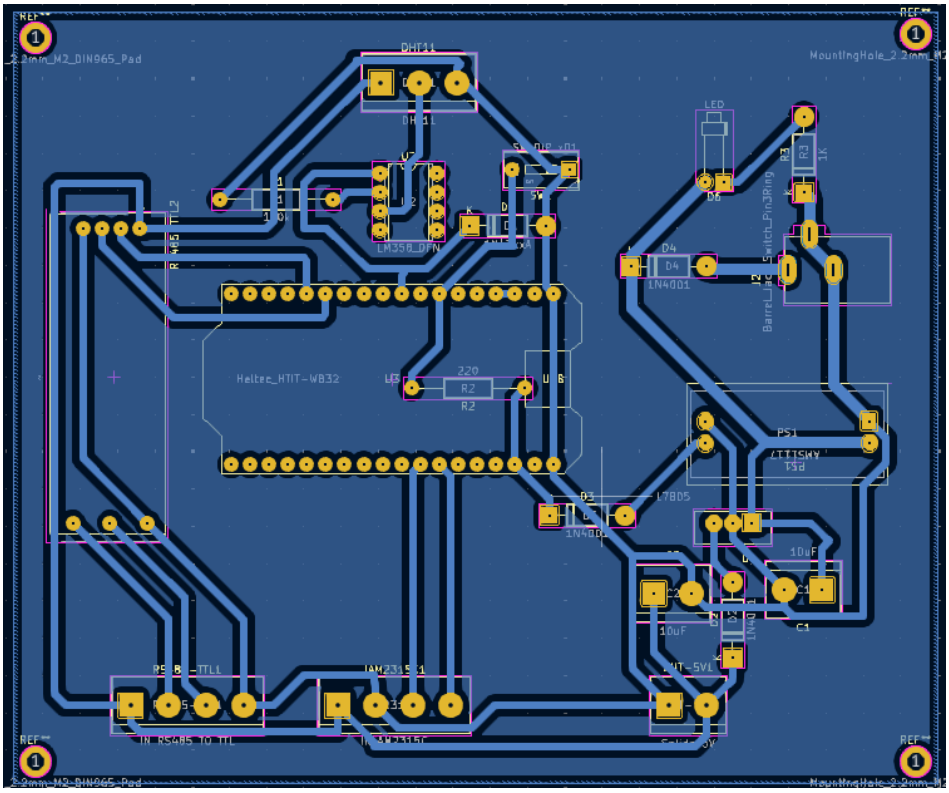


Figura 67. PCB del nodo sensor

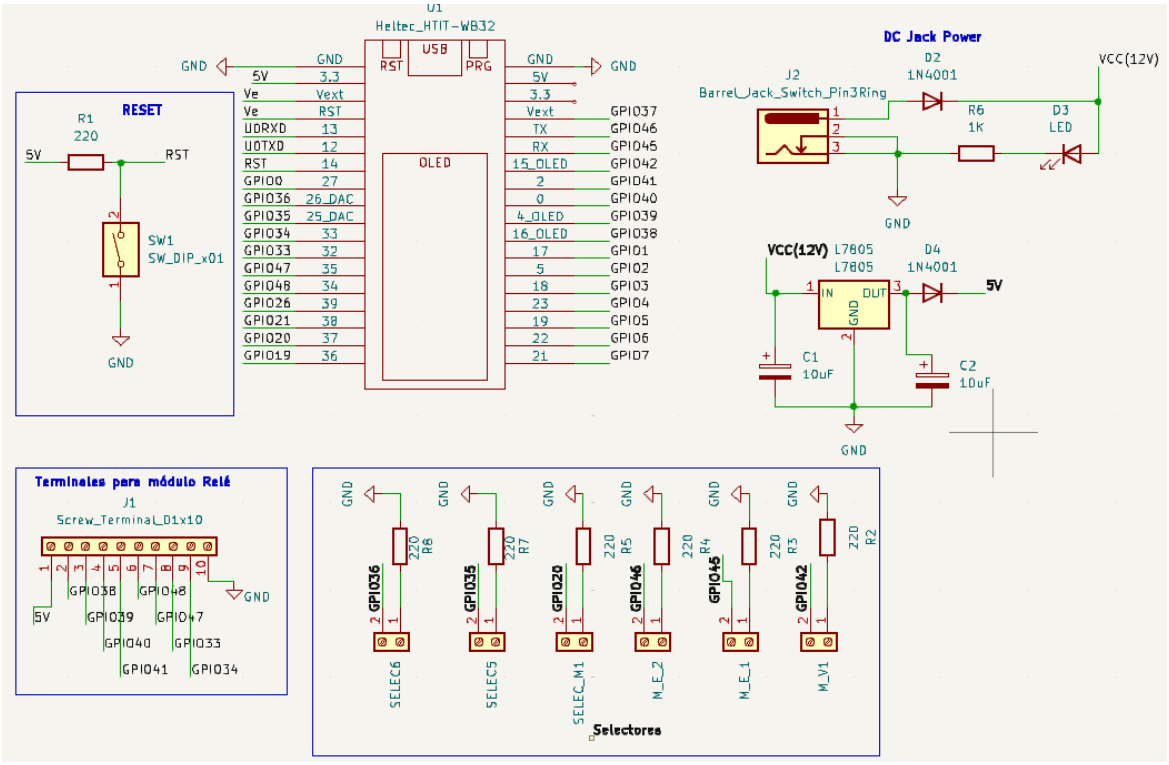


Figura 68. Circuito nodo actuador

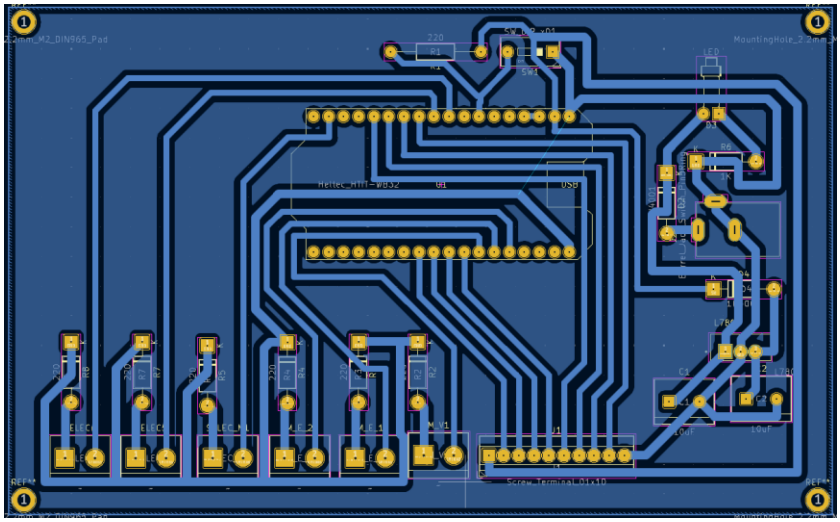


Figura 69. Circuito nodo actuador

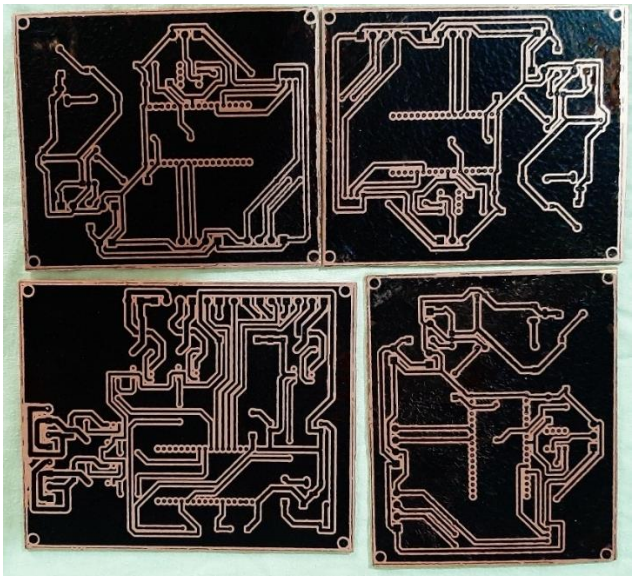


Figura 70. Proceso de transferencia térmica finalizado



Figura 71. Baquelita finalizado proceso de ácido

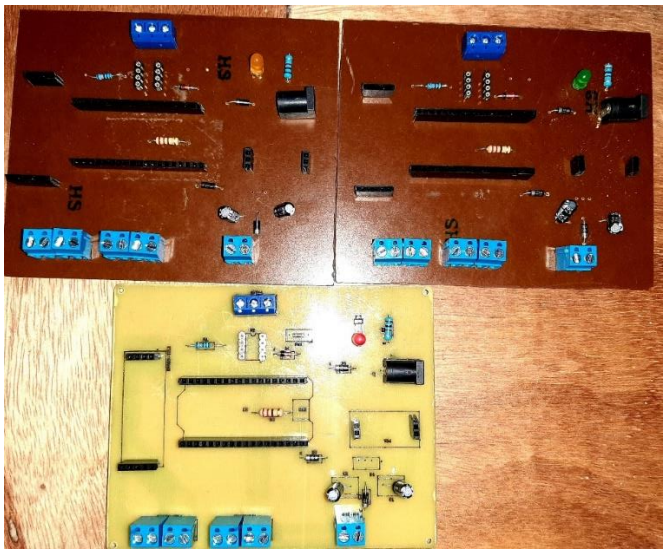


Figura 72. Baqulitas con componentes soldados

c. Montaje del tablero de control

El sistema consta de control manual y automático, por lo que en el tablero se encuentran diferentes selectores que ayudan a seleccionar el modo manual/automático y el control de los actuadores.

El tablero está compuesto por dos breakeres termomagnéticos, los cuales son los encargados de proteger los equipos electrónicos en caso de algún corto circuito. Un transformador de 120VAC a 24VAC debido que las electroválvulas trabajan con 24VAC. La placa PCB donde está el microcontrolador Heltec LoRa32 que recibe los datos desde el Gateway para controlar los actuadores. El módulo relé de 8 canales que sirven para activar o desactivar equipos de alta potencia. La Figura 73 muestra el ensamblaje completo del tablero de control, se observa también dos luces que indicarán si el control del invernadero está en modo manual o automático. Además, en la Figura 74 se observa las electroválvulas cuyos cables de alimentación suben por tubería Conduit hasta el tablero de control.

La Figura 75a muestra una de las placas donde se encuentra el microcontrolador encargado de procesar los datos recolectados por el sensor que se muestra en la Figura 75b, este sensor ya se encuentra en funcionamiento recolectando datos. En la Figura 76 se observa los 3 nodos sensores que están colocados en diferentes sitios del invernadero, donde también se observa el nebulizador situado en la parte superior que está conectado a una manguera que viene por la parte superior del invernadero. Se

observa también uno de los ventiladores que ayudan a mantener fresco el interior del invernadero.



Figura 73. Tablero de control



Figura 74. Conexión de electroválvulas

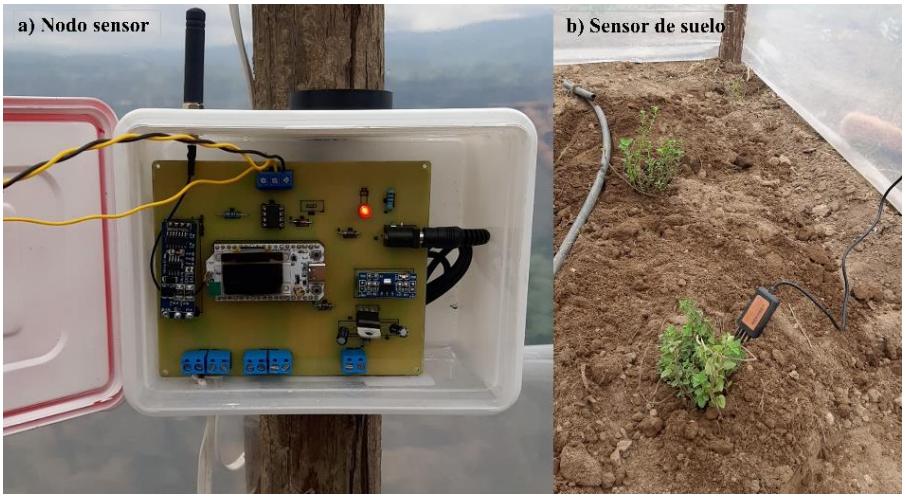


Figura 75. a) Nodo sensor, b) Sensor de suelo



Figura 76. Nodos sensores colocados en el invernadero

d. Visualización de datos

Para visualizar los datos de manera grafica se usó Grafana, donde se colocó Gauges que permite la visualización de los valores medidos en tiempo real. Como se observa en la Figura 77.

La Figura 78 muestra la gráfica en series de tiempo, en esta se puede observar de manera gráfica los datos históricos según el tiempo que el usuario elija. En la parte superior derecha de la interfaz se encuentran las opciones para elegir los tiempos según el usuario lo necesite. La Figura 79 muestra el tiempo del navegador local, donde el usuario tiene para elegir los datos históricos que desea ver según el tiempo seleccionado.

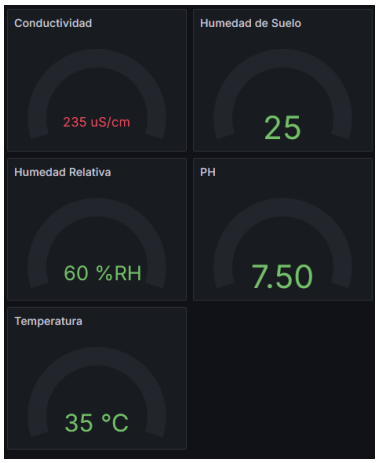


Figura 77. Gauges para visualización en tiempo real

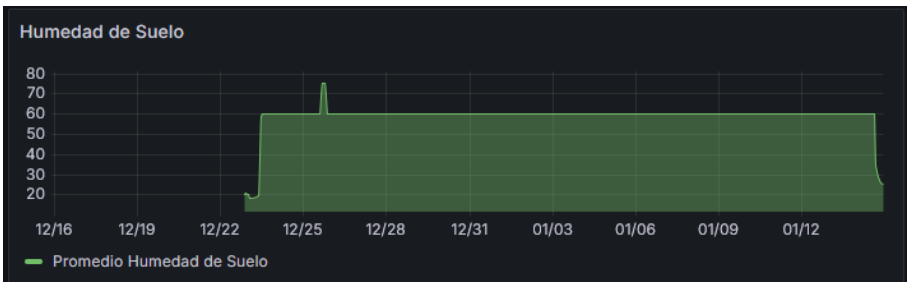


Figura 78. Gráfica en series de tiempo

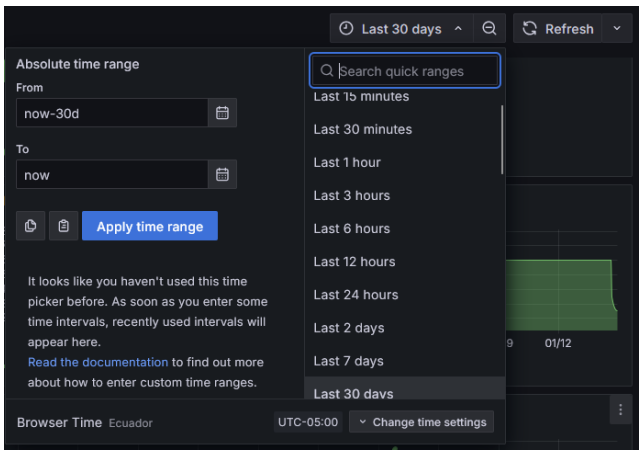


Figura 79. Tiempo del navegador local

En caso de que el usuario desee ver los datos en una tabla, tiene la opción de descargar los datos históricos en formato xlsx. Cada gráfica de series de tiempo al poner el cursor sobre ella muestra tres puntos verticales en la esquina de la gráfica. La Figura 80 muestra a detalle lo forma correcta de descargar los datos formato xlsx.

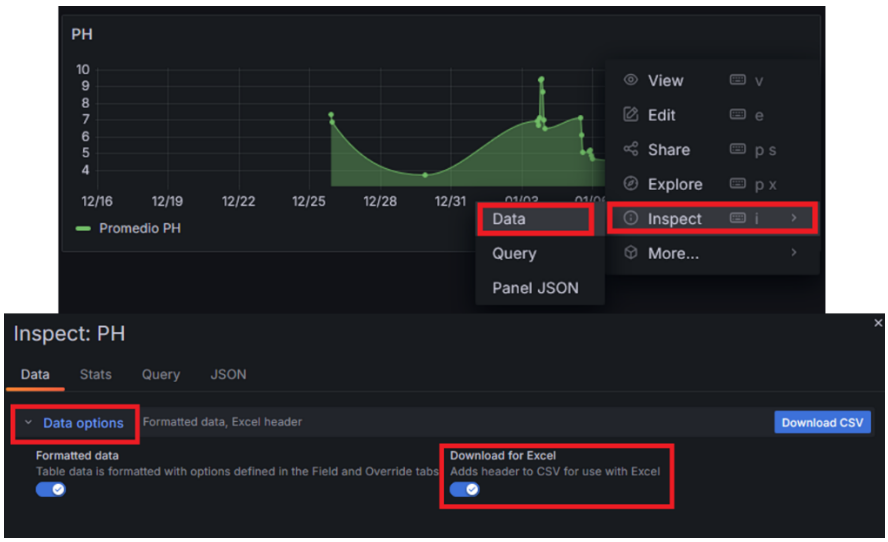


Figura 80. Descarga de datos históricos en formato xlsx

La Figura 81 muestra la tabla en Excel con los datos históricos descargados desde Grafana.

	A	B	C	D	E	F
1	Time	promedioConductividad Promedio Mediciones	promedioHum Promedio Mediciones	promedioHumRelativa Promedio Mediciones	promedioPh Promedio Mediciones	promedioTemp Promedio Mediciones
2	25/12/2024 22:00	1051	60	56.6	7.33	22.1
3	25/12/2024 23:00	988	60	57.3	6.89	22.6
4	29/12/2024 22:00	939	60	66	3.73	18.7
5	03/01/2025 16:00	977	60	65.3	6.96	18.7
6	03/01/2025 17:00	976	60	63.4	6.72	18.7
7	03/01/2025 18:00	997	60	63.6	7.16	18.7
8	03/01/2025 19:00	972	60	63.5	9.40	18.8
9	03/01/2025 20:00	972	60	64.0	9.46	18.7
10	03/01/2025 21:00	944	60	64.0	8.66	24.2
11	03/01/2025 22:00	976	60	62.9	7.03	50
12	03/01/2025 23:00	967	60	62.4	6.47	50
13	05/01/2025 12:00	1118	60	72.8	7.17	50
14	05/01/2025 13:00	1056	60	57.8	6.10	50
15	05/01/2025 14:00	1130	60	45.8	5.10	50
16	05/01/2025 21:00	1142	60	44.9	5.18	50
17	05/01/2025 22:00	1130	60	44.8	5.24	50
18	05/01/2025 23:00	1082	60	44.0	4.91	50
19	06/01/2025 0:00	1105	60	44.5	4.71	50
20	14/01/2025 14:00	829	60	0	4.13	50
21	14/01/2025 15:00	897	60	9.02	5.26	50
22	14/01/2025 16:00	539	35	30.5	7.47	41.9
23	14/01/2025 22:00	235	25	0	7.50	35
24	14/01/2025 22:39	235	25	0	7.50	35

Figura 81. Datos históricos en excel

En la Figura 82 se observa la interfaz final del sistema, donde se tiene Gauges para indicar si el modo de control está en automático o manual, el estado de los actuadores

ON/OFF y también Gauges que permite visualizar los valores medidos en tiempo real. También muestra gráficas en series de tiempo de cada una de las variables medidas.



Figura 82. Interfaz gráfica de las mediciones

e. Confiabilidad del sistema

Despues de haber hecho las mediciones con el sistema desarrollado, como se ilustra en la Figura 75b, y de haber analizado las variables medidas a través de la interfaz de Grafana, presentada en la Figura 82, se procede hacer una comparación con un sensor comercial, específicamente el Soil Survey Instrument, como se muestra en la Figura 83. Este sensor es un dispositivo de medición de suelo diseñado para evaluar parámetros como la humedad, pH, conductividad y temperatura, proporcionando datos de referencia para validar la precisión del sistema implementado.



Figura 83. Sensor soil survey instrument

Para realizar este análisis se emplea las ecuación de error absoluto (1), error relativo (2), porcentaje de error (3) y fiabilidad (4).

$$Error\ Absoluto = |Valor_{exacto} - Valor_{real}| \quad \textbf{(1)}$$

$$Error\ Relativo = \frac{Error_{absoluto}}{Valor_{exacto}} \quad \textbf{(2)}$$

$$\%\ Error = Error_{relativo} * 100 \quad \textbf{(3)}$$

$$Fiabilidad = 100 - \%Error \quad \textbf{(4)}$$

Para realizar un análisis de confiabilidad con respecto a la humedad se ha tomado 12 muestras a diferentes horas del día con los sensores del sistema y con el sensor comercial. Por lo cual, la Tabla 16 muestra los valores de las variables medidas con una confiabilidad del sistema de un 98,75%, lo cual demuestra que tiene una alta precisión al medir esta variable. Adicionalmente, la Figura 84 muestra una gráfica comparativa de las mediciones, donde se superponen los datos del sistema y los del sensor comercial, visualizando la consistencia y mínima desviación entre ambos dispositivos a lo largo del periodo evaluado.

Tabla 16. Confiabilidad de humedad

Número de muestra	**Humedad %(Soil Survey Instrument)**	**Humedad %(sensor del sistema)**	**Error absoluto**	**Error relativo**	**Porcentaje de error**
1	25	25	0,0	0,000	0,0%
2	27	26	1,0	0,037	3,70%
3	24	25	1,0	0,042	4,16%
4	25	25	0,0	0,000	0,00%
5	25	25	0,0	0,000	0,00%
6	23	23	0,0	0,000	0,00%
7	26	26	0,0	0,000	0,00%
8	27	27	0,0	0,000	0,00%
9	29	29	0,0	0,000	0,00%
10	30	29	1,0	0,033	3,33%
11	28	28	0,0	0,000	0,00%
12	27	26	1,0	0,037	3,70%
			Promedio de error		1,24%
			Confiabilidad		98,75%

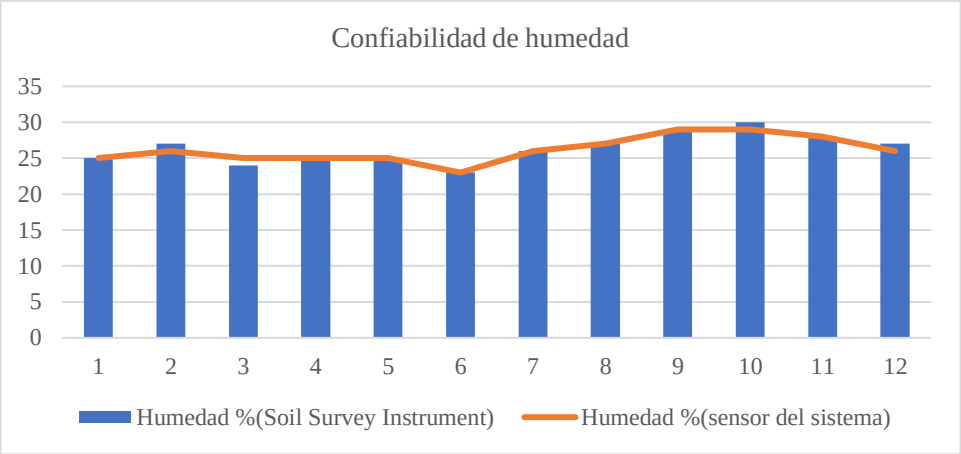


Figura 84. Confiabilidad de humedad

La Tabla 17 muestra valores de pH medidos con el sistema desarrollado y el sensor comercial, obteniendo una confiabilidad de un 98,54%, evidenciando una alta precision en la toma de muestras. Complementando esta informacion, la Figura 85 presenta una gráfica de comparación temporal entre ambos dispositivos, donde se visualiza la tendencia coherente de las mediciones y la dispersión mínima entre ellas, reforzando la consistencia del sistema propuesto frente al estándar comercial.

Tabla 17. Confiablidad de PH

Número de muestra	**PH %(Soil Survey Instrument)**	**PH %(sensor del sistema)**	**Error absoluto**	**Error relativo**	**Porcentaje de error**
1	7	7	0,0	0,000	0,00%
2	6,9	6,8	0,1	0,014	1,45%
3	6,8	6,9	0,1	0,015	1,47%
4	7	6,9	0,1	0,014	1,43%
5	7,1	7	0,1	0,014	1,41%
6	7,4	7,4	0,0	0,000	0,00%
7	6,9	6,7	0,2	0,029	2,90%
8	6,9	7	0,1	0,014	1,45%
9	6,5	6,6	0,1	0,015	1,54%
10	6,6	6,4	0,2	0,030	3,03%
11	7	6,9	0,1	0,014	1,43%
12	7	6,9	0,1	0,014	1,43%
			Promedio de error		1,46%
			Confiabilidad		98,54%

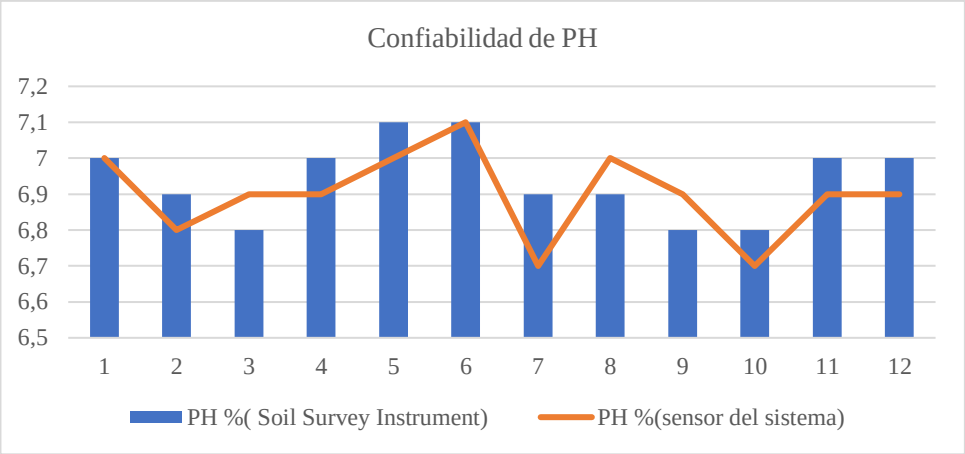


Figura 85. Confiabilidad de PH

En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** muestra valores medidos de la conductividad, evidenciando una confiabilidad del sistema del 98,94%, demostrando una alta precision en la toma de muestras. La Figura 86 exhibe una gráfica de dispersión comparativa entre ambos dispositivos, donde se observa una correlación casi lineal y una mínima desviación en los puntos de medición, validando visualmente la robustez y exactitud del sistema propuesto.

Tabla 18. Confiabilidad de conductividad

Número de muestra	**Conductividad %(Soil Survey Instrument)**	**Conductividad %(sensor del sistema)**	**Error absoluto**	**Error relativo**	**Porcentaje de error**
1	230	229	1,0	0,004	0,43%
2	225	224	1,0	0,004	0,44%
3	240	230	10,0	0,042	4,17%
4	235	230	5,0	0,021	2,13%
5	234	234	0,0	0,000	0,00%
6	236	236	0,0	0,000	0,00%
7	239	240	1,0	0,004	0,42%
8	240	235	5,0	0,021	2,08%
9	240	240	0,0	0,000	0,00%
10	230	230	0,0	0,000	0,00%
11	230	235	5,0	0,022	2,17%
12	235	233	2,0	0,009	0,85%
			Promedio de error		1,06%
			Confiabilidad		98,94%

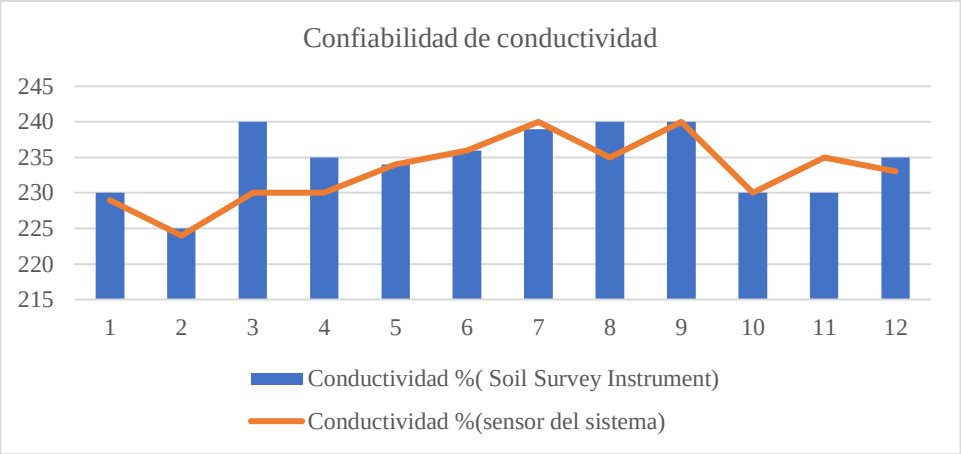


Figura 86. Confiabilidad de conductividad

Una vez medido el suelo se evidencio que la electrovalvula destinada para el riego se activó de manera correcta cuando los valores de la humedad no se encontraban en el rango normal que es entre 25 y 60%, demostrando de esta manera que con una humedad adecuada tambien disminuye el pH y condcutvidad para que estos esten dentro de los umbrales ideales. Y una vez que los valores de humedad y pH lleguen al rango ideal que es entre 5,5 y 6,5 [63]. La electroválvula se desactivó de manera automática.

Tabla 19. Confiabilidad Temperatura

Número de muestra	**Temperatura %(Soil Survey Instrument)**	**Temperatura %(sensor del sistema)**	**Error absoluto**	**Error relativo**	**Porcentaje de error**
1	19	19	0,0	0,000	0,00%
2	19	18	1,0	0,053	5,26%
3	20	20	0,0	0,000	0,00%
4	20	19	1,0	0,050	5,00%
5	25	23	2,0	0,080	8,00%
6	24	24	0,0	0,000	0,00%
7	28	27	1,0	0,036	3,57%
8	29	28	1,0	0,034	3,45%
9	30	30	0,0	0,000	0,00%
10	35	35	0,0	0,000	0,00%
11	34	33	1,0	0,029	2,94%
12	20	22	2,0	0,100	10,00%
			Promedio de error		3,19%
			Confiabilidad		96,81%

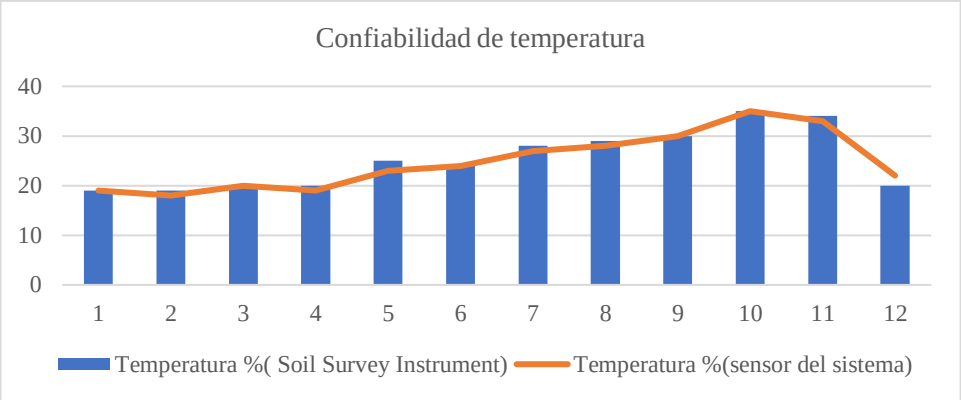


Figura 87. Confiabilidad de Temperatura

La Tabla 19 muestra una confiabilidad del 96,81% en la ediciones de temperatura realizadas, demostrando asi que el sistema tiene un desempeño aceptable al momento de medir la temperatura. Ademas, la Figura 87 despliega una gráfica de tendencia temporal que compara las mediciones del sistema con las de un sensor comercial, donde se observa una coherencia en las fluctuaciones térmicas y una dispersión mínima entre los puntos de datos, confirmando así la capacidad del sistema para operar dentro de márgenes de error controlados en condiciones reales.

Puesto que los rangos ideales de temperatura estan entre 20 y 28º C [64]. El sistema de control demostró funcionar de forma correcta debido a que se activaron en el momento en que la temperatura sobrepasaba los umbrales ideales y de igual forma se desactivaron al estar en la temperatura adecuada.

Tabla 20. Confiabilidad de Humedad Relativa

Número de muestra	Humedad Relativa %(Soil Survey Instrument)	Humedad Relativa %(sensor del sistema)	Error absoluto	Error relativo	Porcentaje de error
1	30	32	2,0	0,067	6,67%
2	40	39	1,0	0,025	2,50%
3	45	44	1,0	0,022	2,22%
4	55	55	0,0	0,000	0,00%
5	60	59	1,0	0,017	1,67%
6	65	63	2,0	0,031	3,08%
7	68	65	3,0	0,044	4,41%
8	65	64	1,0	0,015	1,54%
9	65	65	0,0	0,000	0,00%
10	64	63	1,0	0,016	1,56%
11	60	61	1,0	0,017	1,67%
12	62	64	2,0	0,032	3,23%
			Promedio de error		2,38%
			Confiabilidad		97,62%

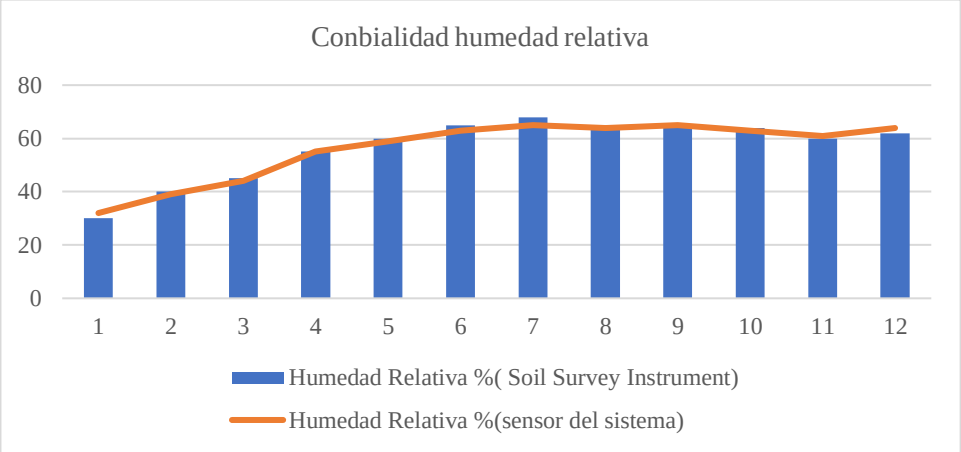


Figura 88. Confiabilidad Humedad Relativa

La Tabla 20 detalla los valores medidos de humedad relativa comparando el sistema desarrollado y un sensor comercial de referencia, obteniendo una confiabilidad del 97,62%, Este resultado confirma que el sistema posee un desempeño confiable para medir esta variable, con errores mínimos en la mayoría de las muestras. Para complementar el análisis, la Figura 88 ilustra una gráfica comparativa entre ambos dispositivos, destacando la proximidad de los valores y la distribución coherente de los errores a lo largo de las 12 muestras.

El rango ideal de humedad dentro de un invernadero esta entre 50% y 70% [64]. Por lo que, el sistema de control demostró ser efectivo puesto que en mediciones fuera de los umbrales ideales la electroválvula encargada de los nebulizadores se activó en el momento adecuado, de la misma forma se desactivó al momento que los umbrales llegaron a su rango ideal.

3.1.9 Costos

En el presente apartado se detalla los costos económicos de los recursos empleados para el desarrollo del proyecto de investigación.

a. Costos de insumos del proyecto

La Tabla 21 muestra el costo de equipos usados para el desarrollo de los tres nodos de sensores.

Tabla 21. Presupuesto nodo sensores

Nodo sensores (3)			
Materiales	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Heltec LoRa32	3	$ 40,00	$ 120,00
Diodo 1N4728	4	$ 0,35	$ 1,40
Amplificador operacional LM358N	4	$ 0,50	$ 2,00
Borneras	18	$ 0,40	$ 7,20
Espadines	3	$ 0,60	$ 1,80
Baquelita electrónica	2	$ 4,00	$ 8,00
Estaño (metro)	1	$ 0,75	$ 0,75
Acido para baquelita	1	$ 0,75	$ 0,75
Gabinete	3	$ 20,00	$ 60,00
Sensor de suelo	3	$ 100,00	$ 300,00
Señor ambiente (DHT11)	3	$ 3,50	$ 10,50
Tinta UV para PCB	1	$ 6,00	$ 6,00
Fuente de 12V	3	$ 3,50	$ 10,50
Regulador L7805	3	$ 0,55	$ 1,65
		Total	$ 530,55

La Tabla 22 muestra el presupuesto usado en el desarrollo del nodo actuador y en la adquisición del Gateway y el servidor.

Tabla 22. Presupuesto nodo actuadores, gateway y servidor

Nodo actuador			
Materiales	**Cantidad**	**Valor unitario**	**Valor total**
Heltec LoRa32	1	$ 40,00	$ 40,00
Modulo Reles	1	$ 10,00	$ 10,00
Borneras	7	$ 0,40	$ 2,80
Espadines	2	$ 0,60	$ 1,20
Baquelita electrónica	1	$ 4,00	$ 4,00
Regulador L7805	1	$ 0,55	$ 0,55
Fuente de 12V	1	$ 3,50	$ 3,50
Estaño (metro)	1	$ 0,75	$ 0,75
Acido para baquelita	1	$ 0,75	$ 0,75
Electrovalvulas	3	$ 40,00	$ 120,00
Ventiladores	4	$ 100,00	$ 400,00
Nebulizadores	5	$ 2,00	$ 10,00
Gateway			
HT-M02	1	$ 400,00	$ 400,00
Servidor			
Raspberry Pi 4B	1	$ 150,00	$ 150,00
Case	1	$ 12,00	$ 12,00
		Total	$ 1155,55

La Tabla 23 detalla el presupuesto ocupado en el montaje del tablero de control.

Tabla 23. Presupuesto para el tablero de control

Tablero de control			
Materiales	**Cantidad**	**Valor Unitario**	**Valor total**
Luces indicadoras	2	$ 2,50	$ 5,00
Selectores	5	$ 3,50	$ 17,50
Gabinete	1	$ 45,00	$ 45,00
Switch termomagnetico	3	$ 5,00	$ 15,00
Rieles	1	$ 3,75	$ 3,75
Otros			
Cinta aislante	1	$ 1,00	$ 1,00
Abrazaderas de alta presión	20	$ 0,75	$ 15,00
Cable timbre (metro)	10	$ 0,40	$ 4,00
Cable gemelo de 12 (metro)	50	$ 0,70	$ 35,00
Broca de taladro	1	$ 2,00	$ 2,00
		Total	$ 145,25

El costo total en insumos es de $ 1829,35 ,que es la suma de la Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23.

b. Costo desarrollo técnico

El sueldo de un ingeniero recién egresado es de $858 según datos del ministerio del trabajo. Para el cálculo de la remuneración se hace uso de la ecuación (5), considerando que el mes tiene 21 días laborables y se trabaja 8 horas diarias.

$$\boldsymbol{remuneración\ dia = \frac{remuneración\ por\ mes}{dias\ laborables}} \quad \textbf{(5)}$$

$$remuneración\ dia = \frac{858}{21} = \$40.86$$

$$remuneración\ hora = \frac{40.86}{8} = \$5.11$$

Considerando que las horas empleadas en el desarrollo del proyecto fueron de 120, basándose en la ecuación (6) el costo total del desarrollo técnico viene siendo de $600

$$\boldsymbol{remuneración_{total} = remuneración_{hora} * horas_{trabajadas}} \quad \textbf{(6)}$$

$$remuneración_{total} = 5.11 * 120 = 613{,}2$$

c. Presupuesto total

Para obtener el presupuesto final, se emplea la Ecuación (7), dando como resultado $ 24442,55 como costo final del desarrollo del proyecto.

$$\boldsymbol{Presupuesto\ _{final} = insumos\ proyecto + desarrollo\ técnico} \quad \textbf{(7)}$$

$$Presupuesto\ _{final} = 1829{,}35 + 613{,}2 = \$\ 2442{,}55$$

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El uso de invernaderos en la agricultura se ha vuelto cada vez más común, ya que protege a la plantación de cambios climáticos abruptos como heladas, lluvias intensas, vientos fuertes hasta incluso granizados. Sin embargo, esto no garantiza mayor producción y cultivos de buena calidad, por lo que se requiere un mayor control del suelo y ambiente dentro del invernadero. Por lo que se ha llevado a cabo un análisis de las principales variables a monitorear como el pH, humedad de suelo, conductividad, temperatura y humedad relativa, este análisis permitió establecer estrategias de agricultura de precisión que permita adaptar el terreno según las necesidades de las plantaciones, promoviendo así, la sostenibilidad, aumentos de producción de los cultivos del invernadero en Susudel-Azuay.

- La arquitectura IoT propuesta permitió tener una base sólida para la integración de tecnologías como sensores, comunicación IoT y actuadores. Esta estructura compuesta por cuatro etapas permite identificar aspectos clave como la interconexión entre cada etapa y las tecnologías necesarias.

- En el desarrollo del proyecto, un aspecto de suma importancia es la selección de software y hardware implementado en el sistema. En el mercado se puede encontrar un sin número de sensores tanto para suelo como de ambiente. Sin embargo, se debe considerar que los sensores de suelo deben tener certificación IP68 que los hace resientes al agua y al polvo. Puesto que se trabaja con el microcontrolador Heltec LoRa32 y el Gateway HT-M02 se optó por trabajar con el protocolo LoRaWAN. Se optó por trabajar con una base de datos de series temporales que es InfluxDB, que es especializada para trabajar con grandes volúmenes de datos que son generados y almacenados por dispositivos IoT en tiempo real. Para procesar los datos, Node-RED ha sido fundamental por su fácil integración con MQTT e InfluxDB. Por otro parte, a través de

Grafana se ha podido llevar una visualización dinámica e histórica de las variables medidas dentro del invernadero.

- El sistema desarrollado permitió monitorear variables como pH, conductividad, humedad, temperatura y humedad relativa con una confiabilidad del 98.1%. En lo que respecta al control de actuadores se evidencio una efectividad del 100%, activándose y desactivándose en los momentos idóneos, permitiendo así tener un control adecuado, contribuyendo así al ahorro de recursos como agua y fertilizante. A pesar de que el sistema tiene la capacidad de funcionar de manera autónoma, se incorporó selectores que permiten controlar los actuadores de forma manual.

- El sistema de gestión desarrollado con Node-Red, InfluxDB y Grafana resultó ser de fácil integración entre cada uno de ellos, siendo Node-Red el encargado de procesar los datos y enviarlos hacia InfluxDB fácilmente. La incorporación de una base de datos no relacional, como InfluxDB, permitió gestionar de manera fácil y rápida los datos en tiempo real, gracias a que maneja datos de series temporales, facilitando su almacenamiento y análisis dinámico y preciso. El uso de Grafana ayudó a que se visualicen todos los datos adquiridos en tiempo real de manera dinámica gracias a sus gráficas de series temporales. Además, permite establecer un sistema de alerta a través de Telegram en caso de que algún nodo deje de enviar los datos o si alguno de los valores medidos este fuera del umbral adecuado.

- La presente investigación aporta al proyecto "Enhancing the Agrifood Supply Chain towards Industry 5.0 (AGRO5) in the Ecuadorian Andes", al desarrollar un sistema de monitoreo y control de variables agrícolas basado en sensores IoT y redes LoRaWAN. La implementación de este sistema contribuye a la digitalización del sector agrícola, promoviendo una producción más eficiente y sostenible. Con ello, se aporta al cumplimiento del objetivo del proyecto de investigación: “Implementar una CSA basada en el enfoque Industria 5.0 (I5.0), que contribuya a garantizar patrones de producción sostenibles, soberanía alimentaria y el bienestar de los agricultores”.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda integrar un sistema de aprendizaje automático en base a los datos históricos, para que permita predecir tendencias futuras como temperatura, humedad, pH y conductividad.

- Para el sistema de alertas se recomienda usar también un sistema de notificación mediante SMS puesto que el usuario no siempre puede contar con acceso a internet en su dispositivo móvil.

- Se sugiere el uso de paneles solares para el funcionamiento de los dispositivos electrónicos como microcontroladores y sensores, garantizando así un funcionamiento sin interrupciones de los dispositivos sin importar los cortes de energía eléctrica.

- Para un mayor control de temperatura dentro del invernadero se recomienda el uso de motores de bajas revoluciones para subir o bajar las cortinas del invernadero, ajustándolo que realice esta tarea de manera automática según los datos medidos dentro del invernadero.

- Se recomienda que los equipos o maquinaria a usar en el invernadero sea de 220VAC para que se disminuya el consumo de corriente. De esta manera el usuario pueda aumentar la cantidad de equipos como ventiladores o motores funcionando al mismo tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. Rodríguez Rubí, “Análisis de vulnerabilidad agrícola al cambio climático para la región del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA)”, Mexico, 2023.

[2] D. Serrano, “II Simposio de manejo y fertilidad de suelos”, Quito, may 2023. Consultado: el 17 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.usfq.edu.ec/es/eventos/segundo-simposio-de-manejo-y-fertilidad-de-suelos

[3] B. Pérez, “Suelo con alta fertilidad para actividades agrícolas”. Consultado: el 8 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.elmercurio.com.ec/2022/09/01/azuay-registra-el-449-de-suelo-fertil-para-actividades-agricolas/

[4] P. Arregoces-Guerra *et al.*, “Monitoreo de cultivos bajo invernadero utilizando tecnologías 4.0”, *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 24, núm. 2, p. 2853, 2023, doi: 10.21930/RCTA.VOL24_NUM2_ART:2853.

[5] D. Peña, S. Fajardo, y D. Galindo, “AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y SISTEMAS BASADOS EN IOT: CASO DE ESTUDIO CANNABIS MEDICINAL”, Universidad de los Andes Colombia, Bogotá, 2022.

[6] F. Pérez, “SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL Y MONITOREO BASADO EN TECNOLOGÍA LORAWAN Y MQTT PARA EL CULTIVO DE HORTALIZAS BAJO INVERNADERO”, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2023.

[7] M. Montaño-Blacio *et al.*, “DISEÑO Y DESPLIEGUE DE UN SISTEMA DE MONITOREO BASADO EN IOT PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS.”, *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología* , vol. 2023, núm. 30, pp. 9–18, jul. 2023, doi: 10.17163/INGS.N30.2023.01.

[8] B. Peñaranda, “DESARROLLO DE UN SISTEMA IOT PARA EL MONITOREO REMOTO DE VARIABLES EN UN HUERTO AGRÍCOLA”, Salesiana, Cuenca, 2024.

[9] A. Hermosilla, “Análisis comparativo de la producción de hortalizas bajo plástico versus la producción de hortalizas tradicional o al aire libre”, Chillán, 2018. Consultado: el 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/2859

[10] C. Miguez, “Prospección de agricultura protegida en el Litoral Ecuatoriano”, Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo, 2023. Consultado: el 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14832

[11] Agrofacto, “Características de un buen invernadero - Agrofacto”. Consultado: el 25 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://agrofacto.com/buen-invernadero/

[12] Herbotecnia, “Cultivo de Cedron, Hierba Luisa (Aloysia triphylla) y usos, herbotecnia”. Consultado: el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.herbotecnia.com.ar/aut-cedron.html

[13] J. Amigo, “Cuidados de la menta”. Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.mundohuerto.com/cultivos/menta/cuidados

[14] M. Lobos, “Yuyo colorado – Maleza en foco”. Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.malezaenfoco.com/resistencia-a-herbicidas/malezas-resistentes/yuyo-colorado/

[15] M. Zubillaga, “Comportamiento del cultivo de amaranto en el valle inferior del río Negro, Argentina : optimización de las condiciones del cultivo”. Consultado: el 17 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://1library.co/document/y81r594z-comportamiento-cultivo-amaranto-inferior-argentina-optimizacion-condiciones-cultivo.html

[16] Flores y Plantas Iris, “Cultivando la Hierba Luisa: Consejos y Trucos | Flores y Plantas Iris”. Consultado: el 17 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.floresyplantasiris.es/cultivando-la-hierba-luisa-consejos-y-trucos/#google_vignette

[17] A. Dominguez, “¿Qué es la Citronela o Lemongrass (Cymbopogon citratus) y Por Qué Deberías Cultivarla? – Esencias De Tierra”. Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://esenciasdetierra.com/que-es-la-citronela-o-lemongrass-cymbopogon-citratus-y-por-que-deberias-cultivarla/

[18] El Tlacualero, “Ficha Técnica: Manzanilla (matricaria recutita) Cadena Hierbas Aromáticas y Especias”. Consultado: el 18 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.incmnsz.mx/2022/Huerto/Hierbas/Manzanilla.pdf

[19] Agrinova Science, “El cultivo del Clavel”. Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.infoagro.com/documentos/el_cultivo_del_clavel.asp

[20] ATLAS Exportadoras S.A., “Ficha Técnica de Orégano ‘Origanum vulgare’”. Consultado: el 17 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.atlas-export.cl/wp-content/files_mf/1371438944atlas_ficha_oregano.pdf

[21] PictureThis, “Hierba de purgas (Aerva sanguinolenta) - PictureThis”. Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.picturethisai.com/es/wiki/Aerva_sanguinolenta.html

[22] O. Cajas Reyes, “ESTABLECIMIENTO DEL JARDÍN DE PLANTAS MEDICINALES EN EL CENTRO EXPERIMENTAL LA PLAYITA”, Universidad Técnica de Cotopaxi, 2017.

[23] P. Coba Santamaría, D. Coronel, K. Verdugo, M. F. Paredes, E. Yugsi, y L. Huachi, “ESTUDIO ETNOBOTÁNICO DEL MORTIÑO (Vaccinium floribundum) COMO ALIMENTO ANCESTRAL Y POTENCIAL

ALIMENTO FUNCIONAL", vol. 16, núm. 2, pp. 5–13, dic. 2012, [En línea]. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047400002

[24] IIAP, "CULTIVO DE LAS PLANTAS MEDICINALES". Consultado: el 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.iiap.org.pe/upload/publicacion/cdinvestigacion/iiap/IIAP2/CAPITULOIII-27.HTM

[25] FAO, "El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022", *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022*, dic. 2022, doi: 10.4060/CB9479ES.

[26] R. R. Hernández, "La agricultura de precisión. Una necesidad actual", *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 11, núm. 1, pp. 67–74, 2021.

[27] V. Moysiadis, P. Sarigiannidis, V. Vitsas, y A. Khelifi, "Smart Farming in Europe", *Comput Sci Rev*, vol. 39, p. 100345, feb. 2021, doi: 10.1016/J.COSREV.2020.100345.

[28] E. Said Mohamed, A. A. Belal, S. Kotb Abd-Elmabod, M. A. El-Shirbeny, A. Gad, y M. B. Zahran, "Smart farming for improving agricultural management", *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 24, núm. 3, pp. 971–981, dic. 2021, doi: 10.1016/J.EJRS.2021.08.007.

[29] J. Shulze, "What Is the Internet of Things (IoT)? With Examples | Coursera". Consultado: el 21 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.coursera.org/articles/internet-of-things?msockid=1ef29537723460552fc8819c739b6147

[30] U. Yadav, "Characteristics of Internet of Things (IoT) - Scaler Topics". Consultado: el 17 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.scaler.com/topics/characteristics-of-iot/

[31] V. K. Quy *et al.*, "IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges", el 1 de abril de 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/app12073396.

[32] D. Glaroundis, A. Iossifides, y P. Chatzimisios, “Survey, Comparison and Research Challenges of IoT Application Protocols for Smart Farming”, *IEEEXplore*, nov. 2020, doi: https://doi.org/10.1007/s42853-020-00078-3.

[33] W. S. Kim, W. S. Lee, y Y. J. Kim, “A Review of the Applications of the Internet of Things (IoT) for Agricultural Automation”, *Journal of Biosystems Engineering*, vol. 45, pp. 385–400, el 1 de diciembre de 2020. doi: https://doi.org/10.1007/s42853-020-00078-3.

[34] U. Shafi, R. Mumtaz, J. García-Nieto, S. A. Hassan, S. A. R. Zaidi, y N. Iqbal, “Precision Agriculture Techniques and Practices: From Considerations to Applications”, *Sensors 2019, Vol. 19, Page 3796*, vol. 19, núm. 17, p. 3796, sep. 2019, doi: 10.3390/S19173796.

[35] Vation Ventures, “IoT Architecture: Definición, explicación y casos de uso . Vation Ventures”. Consultado: el 21 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.vationventures.com/glossary/iot-architecture-definition-explanation-and-use-cases

[36] D. Buitrón, “Arquitecturas y Modelos de Referencia para Sistemas IoT”, Escuela Politécnica Nacional, 2022.

[37] I. Miladinovic y S. Schefer-Wenzl, “NFV Enabled IoT Architecture for an Operating Room Environmen”, *IEEE*, vol. 4, feb. 2018, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355128.

[38] J. Fernámdez, “Utilización de dispositivos móviles como herramientas de sensado en aplicaciones de IoT”, Universidad Nacional de La Plata, 2021.

[39] C. E. Tonato Chuquimarca y S. Sinche Maita, “Análisis comparativo entre arquitecturas de sistemas IoT”, *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información: RITI, ISSN-e 2387-0893, Vol. 10, Nº. Extra 21, 2022 (Ejemplar dedicado a: Especial), págs. 55-70*, vol. 10, núm. 21, pp. 55–70, sep. 2022, doi: 10.36825/RITI.10.21.006.

[40] A. Vangala, A. K. Das, V. Chamola, V. Korotaev, y J. J. P. C. Rodrigues, “Security in IoT-enabled smart agriculture: architecture, security solutions and challenges”, *Cluster Computing 2022 26:2*, vol. 26, núm. 2, pp. 879–902, abr. 2022, doi: 10.1007/S10586-022-03566-7.

[41] L. Ting, M. Khan, A. Sharma, y M. D. Ansari, “A secure framework for IoT-based smart climate agriculture system: Toward blockchain and edge computing”, *Journal of Intelligent Systems*, vol. 31, núm. 1, pp. 221–236, ene. 2022, doi: 10.1515/JISYS-2022-0012/MACHINEREADABLECITATION/RIS.

[42] M. A. M. Almuhaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, y S. Abdulmalek, “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions”, *Electronics 2022, Vol. 11, Page 164*, vol. 11, núm. 1, p. 164, ene. 2022, doi: 10.3390/ELECTRONICS11010164.

[43] R. Mendoza y A. Espinoza, “Guía Técnica para Muestreo de Suelos”, Managua, pp. 17–20, 2017.

[44] LILYGO, “LoRa32 V2.1_1.6 [US] – LILYGO®”. Consultado: el 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.lilygo.cc/products/lora32-v2-1_1-6-us?srsltid=AfmBOoqX1RcgjH5nJR6WGqCJIoVVM_pV4QfURcdn41ovlXSYvyJUOSJm

[45] Heltec Automation, “WiFi LoRa 32(V3) – Heltec Automation”. Consultado: el 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/

[46] LILYGO, “T-Beam Meshtastic – LILYGO®”. Consultado: el 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.lilygo.cc/products/t-beam-v1-1-esp32-lora-module?srsltid=AfmBOorZ2G_npuF21L_zzkhibzFiqpfxvLiCQ3tw5lffHJDnwc_5QSh5

[47] Electrónicas I+D, “Sensor integrado del suelo. 4 en 1. 24VDC | Didácticas Electrónicas I+D”. Consultado: el 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.didacticaselectronicas.com.co/shop/jxbs-3001-tr-rs-rs485-24v-4en1-sensor-integrado-del-suelo-4-en-1-24vdc-33141#attr=

[48] Darrera, “Combined Temperature and Humidity Sensor | Darrera”. Consultado: el 22 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.darrera.com/en/product/hd9008-combined-temperature-humidity-sensor/

[49] Coltein, “Sensores de humedad volumétrica, temperatura y CE del suelo METER - Coltein”. Consultado: el 22 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://coltein.com/producto/sensores-de-humedad-volumetrica-temperatura-y-ce-del-suelo-meter/

[50] DigChip, “datasheet SHT30-ARP-B”. Consultado: el 22 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/2/1564/SHT30-ARP-B-pdf.php

[51] Raspberry Pi Ltd., “DATASHEET Raspberry Pi 4 Model B”. Consultado: el 18 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf

[52] Microrobotics, “orange-pi5/Orange-Pi5-hardware_spec.pdf at main · microrobotics/orange-pi5 · GitHub”. Consultado: el 22 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://github.com/microrobotics/orange-pi5/blob/main/Orange-Pi5-hardware_spec.pdf

[53] BananaPi Docs, “Banana Pi BPI-M3 | BananaPi Docs”. Consultado: el 22 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://docs.banana-pi.org/en/BPI-M3/BananaPi_BPI-M3

[54] Heltec Automation, “HT-M02 Edge LoRa Gateway (V2) – Heltec Automation”. Consultado: el 1 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://heltec.org/project/ht-m02-v2/

[55] Ltd. RAKwireless Technology CO., “User Manual for WisLink-LoRa Concentrator Module 96Boards IoT Edition RAK2245 96Boards”. Consultado: el 18 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.manualslib.com/manual/1626348/Rakwireless-Rak2245.html?page=3#manual

[56] Ltd. Shenzhen Rakwireless Technology CO., “RAK831 Datasheet”. Consultado: el 18 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://downloads.rakwireless.com/LoRa/RAK831-LoRa-Gateway/Hardware-Specification/RAK831%20Datasheet%20V1.3.pdf

[57] OpenJS Foundation, “Node-RED”. Consultado: el 23 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://nodered.org/

[58] Grafana Labs, “Protocols | Grafana k6 documentation”. Consultado: el 23 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://grafana.com/docs/k6/latest/using-k6/protocols/

[59] Zabbix SIA, “2 Requisitos”. Consultado: el 23 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.zabbix.com/documentation/current/es/manual/installation/requirements

[60] IMMUNE TECHNOLOGY INSTITUTE, “MySQL qué es y cuáles son sus características”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://immune.institute/blog/mysql-que-es-y-sus-caracteristicas/

[61] ALFAIOT-WEBMASTER, “Qué es InfluxDB”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://alfaiot.com/iot/influxdb/

[62] M. Garcia, “MongoDB (Parte I) — Definición, un poco de su arquitectura y base de datos de colecciones con documentos | by Mauricio Garcia | Medium”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://mauriciogc.medium.com/mongodb-parte-i-definici%C3%B3n-un-poco-de-su-arquitectura-y-base-de-datos-de-colecciones-con-3619b184f92b

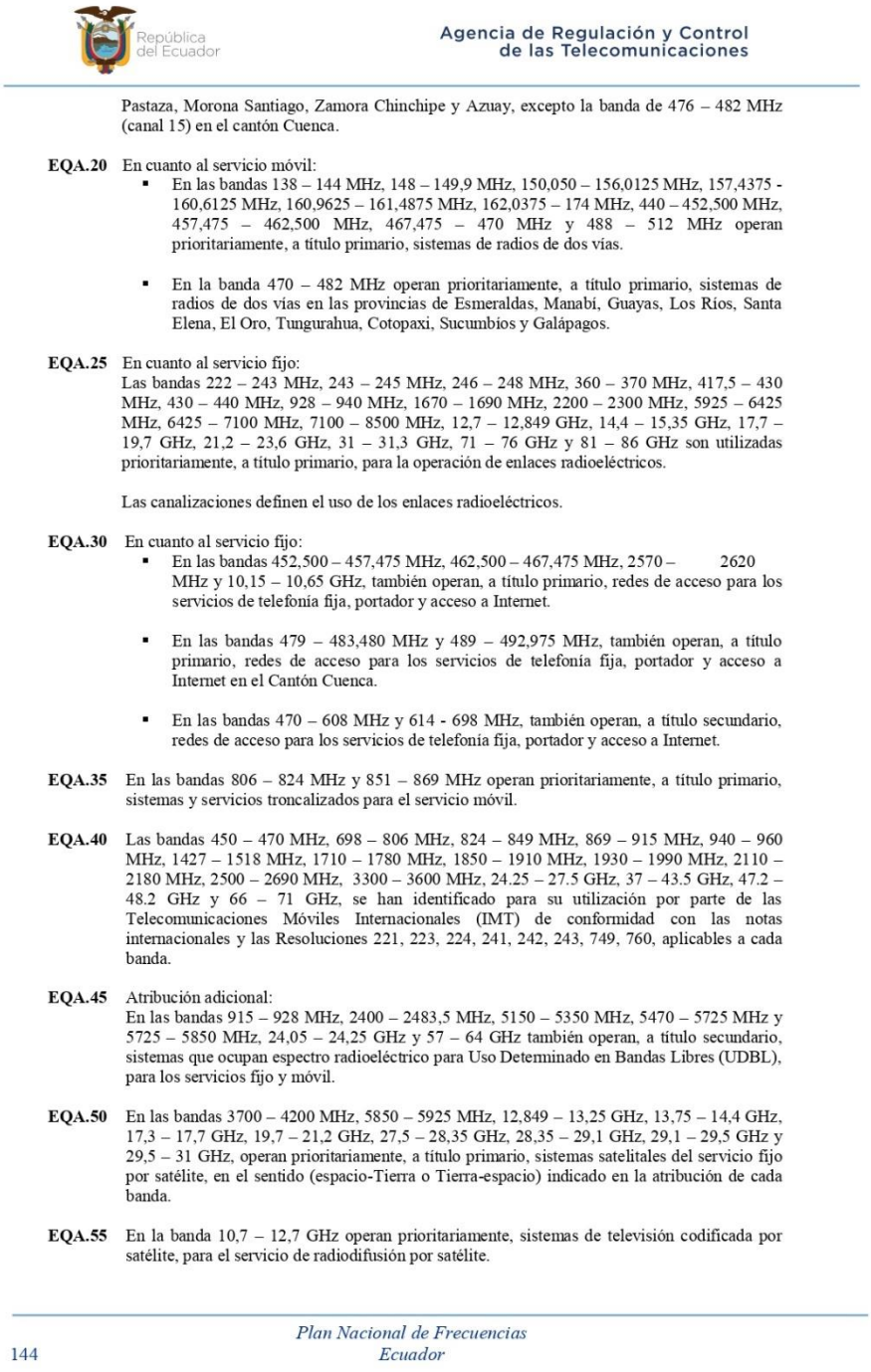
[63] nutricontrol, “La importancia del control de pH en los cultivos - Nutricontrol”. Consultado: el 13 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://nutricontrol.com/es/la-importancia-del-control-de-ph-en-los-cultivos/

[64] Leroy Merlin, “¿Por qué es importante la humedad del aire en un invernadero? | Leroy Merlin”. Consultado: el 13 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.leroymerlin.es/ideas-y-consejos/consejos/por-que-es-importante-humedad-del-aire-en-un-invernadero.html

ANEXOS

Anexo A. Plan Nacional de Frecuencias

En la Figura A1 se muestra las frecuencias de uso libre en el Ecuador.



Pastaza, Morona Santiago, Zamora Chinchipe y Azuay, excepto la banda de 476 – 482 MHz (canal 15) en el cantón Cuenca.

EQA.20 En cuanto al servicio móvil:

- En las bandas 138 – 144 MHz, 148 – 149,9 MHz, 150,050 – 156,0125 MHz, 157,4375 - 160,6125 MHz, 160,9625 – 161,4875 MHz, 162,0375 – 174 MHz, 440 – 452,500 MHz, 457,475 – 462,500 MHz, 467,475 – 470 MHz y 488 – 512 MHz operan prioritariamente, a título primario, sistemas de radios de dos vías.
- En la banda 470 – 482 MHz operan prioritariamente, a título primario, sistemas de radios de dos vías en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas, Los Ríos, Santa Elena, El Oro, Tungurahua, Cotopaxi, Sucumbíos y Galápagos.

EQA.25 En cuanto al servicio fijo:
Las bandas 222 – 243 MHz, 243 – 245 MHz, 246 – 248 MHz, 360 – 370 MHz, 417,5 – 430 MHz, 430 – 440 MHz, 928 – 940 MHz, 1670 – 1690 MHz, 2200 – 2300 MHz, 5925 – 6425 MHz, 6425 – 7100 MHz, 7100 – 8500 MHz, 12,7 – 12,849 GHz, 14,4 – 15,35 GHz, 17,7 – 19,7 GHz, 21,2 – 23,6 GHz, 31 – 31,3 GHz, 71 – 76 GHz y 81 – 86 GHz son utilizadas prioritariamente, a título primario, para la operación de enlaces radioeléctricos.

Las canalizaciones definen el uso de los enlaces radioeléctricos.

EQA.30 En cuanto al servicio fijo:

- En las bandas 452,500 – 457,475 MHz, 462,500 – 467,475 MHz, 2570 – 2620 MHz y 10,15 – 10,65 GHz, también operan, a título primario, redes de acceso para los servicios de telefonía fija, portador y acceso a Internet.
- En las bandas 479 – 483,480 MHz y 489 – 492,975 MHz, también operan, a título primario, redes de acceso para los servicios de telefonía fija, portador y acceso a Internet en el Cantón Cuenca.
- En las bandas 470 – 608 MHz y 614 - 698 MHz, también operan, a título secundario, redes de acceso para los servicios de telefonía fija, portador y acceso a Internet.

EQA.35 En las bandas 806 – 824 MHz y 851 – 869 MHz operan prioritariamente, a título primario, sistemas y servicios troncalizados para el servicio móvil.

EQA.40 Las bandas 450 – 470 MHz, 698 – 806 MHz, 824 – 849 MHz, 869 – 915 MHz, 940 – 960 MHz, 1427 – 1518 MHz, 1710 – 1780 MHz, 1850 – 1910 MHz, 1930 – 1990 MHz, 2110 – 2180 MHz, 2500 – 2690 MHz, 3300 – 3600 MHz, 24.25 – 27.5 GHz, 37 – 43.5 GHz, 47.2 – 48.2 GHz y 66 – 71 GHz, se han identificado para su utilización por parte de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT) de conformidad con las notas internacionales y las Resoluciones 221, 223, 224, 241, 242, 243, 749, 760, aplicables a cada banda.

EQA.45 Atribución adicional:
En las bandas 915 – 928 MHz, 2400 – 2483,5 MHz, 5150 – 5350 MHz, 5470 – 5725 MHz y 5725 – 5850 MHz, 24,05 – 24,25 GHz y 57 – 64 GHz también operan, a título secundario, sistemas que ocupan espectro radioeléctrico para Uso Determinado en Bandas Libres (UDBL), para los servicios fijo y móvil.

EQA.50 En las bandas 3700 – 4200 MHz, 5850 – 5925 MHz, 12,849 – 13,25 GHz, 13,75 – 14,4 GHz, 17,3 – 17,7 GHz, 19,7 – 21,2 GHz, 27,5 – 28,35 GHz, 28,35 – 29,1 GHz, 29,1 – 29,5 GHz y 29,5 – 31 GHz, operan prioritariamente, a título primario, sistemas satelitales del servicio fijo por satélite, en el sentido (espacio-Tierra o Tierra-espacio) indicado en la atribución de cada banda.

EQA.55 En la banda 10,7 – 12,7 GHz operan prioritariamente, sistemas de televisión codificada por satélite, para el servicio de radiodifusión por satélite.

Figura A1. Plan de Frecuencias Ecuatoriana

Anexo B. Descripción técnica del microcontrolador Heltec LoRa32

En la Figura B1 se muestra las especificaciones generales del microcontrolador Heltec LoRa32.

Parameters	Description
Master Chip	ESP32-S3FN8 (Xtensa®32-bit lx7 dual core processor)
LoRa Chipset	SX1262
USB to Serial Chip	CP2102
Frequency	470~510 MHz, 863~928 MHz
Max. TX Power	21 ± 1 dBm
Max. Receiving sensitivity	-134 dBm
Wi-Fi	802.11 b/g/n, up to 150Mbps
Bluetooth	Bluetooth LE: Bluetooth 5, Bluetooth mesh
Hardware Resource	7*ADC1 + 2*ADC2; 7*Touch; 3*UART; 2*I2C; 2*SPI; etc.
Memory	384KB ROM; 512KB SRAM; 16KB RTC SRAM; 8MB SiP Flash
Interface	Type-C USB; 2*1.25 lithium battery interface; LoRa ANT(IPEX1.0); 2*18*2.54 Header Pin
Battery	3.7V lithium battery power supply and charging
Operating temperature	-20 ~ 70 ℃
Dimensions	50.2 * 25.5* 10.2 mm

Figura B1. Especificaciones generales del microcontroladro HeltcLoRa32

Anexo C. Especificaciones técnicas del sensor de suelo

En la Figura C1 se muestra las especificaciones técnicas del sensor de suelo.

TECHNICAL SPECIFICATION

Item	Technical Specification		
	Moisture	Temperature	EC
Range	0-100%（m^3/m^3）	-30℃-+70℃	0-10mS/cm
Accuracy	±2%(0-50%) ±3%(51-100%)	±0.5℃	±3%FS
Output Signal	RS485,0-2V		
Response Time	<1s		
Supply	5VDC, 12-24VDC		
Effective measurement area	With the center of the probe diameter is 70mm, high 70mm cylinder		
Housing	ABS		
Dimensions	45*15*145mm(probe:3* Ø3*70mm)		
Operating Temperature	-40℃-+80℃		
Ingress Protection	IP68		
Storage	10-60℃@20%-90%RH		
Probe material	316L stainless steel		

Dimensional Drawing

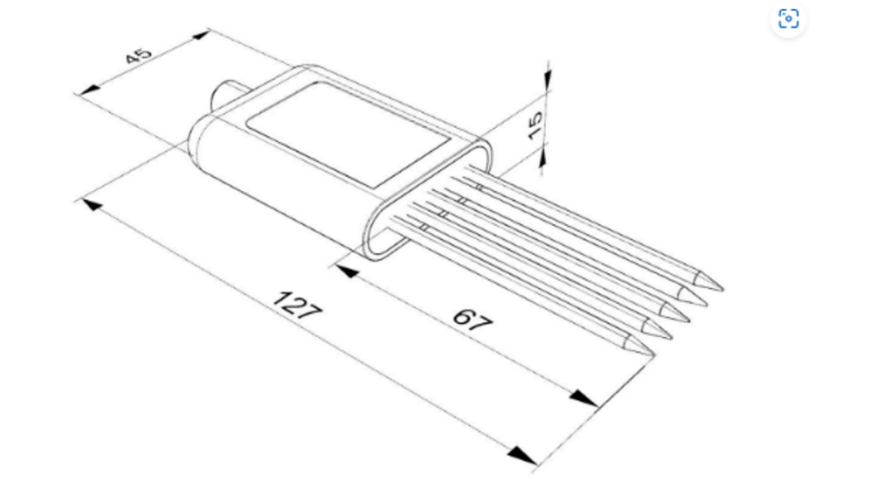


Figura C1. Especificaciones técnicas sensor de suelo

Anexo D. Especificaciones técnicas del Gateway HT-M02

En la Figura D1 se muestra las especificaciones técnicas del Gateway LoRa HT-M02.

Specifications

Hardware	Resources
CPU	ROCKCHIP Quad-core Cortex-A55 64-bit 1.8GHz processor.
RAM	2G DDR4
ROM	32G eMMC 5.1 (available to customize to 8/16/64/128G)
LoRa Baseband	SX1303 + SX1250 chipset;
LoRa TX Power	Up to 26±1dBm
LoRa RX Sensitivity	-125dBm @125KHz/SF7 -139dBm @125KHz/SF12
Operation system	Pre-loaded with Linux (4.19.219 Kernel, aarch 64) Debian 10
Interface	DC Input, UART debug Header, ETH interface, SIM card slot, SMA antenna socket*3 (LoRa, 4G, Wi-Fi 2.4GHz)
Ethernet (Default)	100/1000M.
LTE (Optional)	Cat. 1 / Cat. 4.
Wi-Fi (Optional)	IEEE 802.11 b/g/n
PoE (Optional)	IEEE802.3af
Power supply	4.5~17V DC interface.
Size	125 (+40) * 125 * 52 mm.
Operating temperature	–40 ~ 85 °C

Figura D1. Especificaciones Gateway HT-M02

En la Figura E1 se observa el datasheet de la Raspberry Pi 4B.



2 Features

2.1 Hardware

- Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 running at 1.5GHz
- 1, 2 and 4 Gigabyte LPDDR4 RAM options
- H.265 (HEVC) hardware decode (up to 4Kp60)
- H.264 hardware decode (up to 1080p60)
- VideoCore VI 3D Graphics
- Supports dual HDMI display output up to 4Kp60

2.2 Interfaces

- 802.11 b/g/n/ac Wireless LAN
- Bluetooth 5.0 with BLE
- 1x SD Card
- 2x micro-HDMI ports supporting dual displays up to 4Kp60 resolution
- 2x USB2 ports
- 2x USB3 ports
- 1x Gigabit Ethernet port (supports PoE with add-on PoE HAT)
- 1x Raspberry Pi camera port (2-lane MIPI CSI)
- 1x Raspberry Pi display port (2-lane MIPI DSI)
- 28x user GPIO supporting various interface options:
  - Up to 6x UART
  - Up to 6x I2C
  - Up to 5x SPI
  - 1x SDIO interface
  - 1x DPI (Parallel RGB Display)
  - 1x PCM
  - Up to 2x PWM channels
  - Up to 3x GPCLK outputs

2.3 Software

- ARMv8 Instruction Set
- Mature Linux software stack
- Actively developed and maintained

Figura E1. Especificaciones técnicas de la Raspberry Pi 4B

Anexo F. Código de los nodos sensores

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <Wire.h>
#include "HT_SSD1306Wire.h"
#include <HardwareSerial.h>

// Pines y configuración para el sensor DHT11
#define DHTPIN 48
#define DHTTYPE DHT11
DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);

// Pines y configuración para la comunicación RS-485
#define SIMULATED_UART_TX 48
#define SIMULATED_UART_RX 47
HardwareSerial RS485(2);

// Trama Modbus para leer 4 registros (Humedad, Temperatura, Conductividad, pH)
uint8_t modbusRequest[] = {0x01, 0x03, 0x00, 0x00, 0x00, 0x04, 0x44, 0x09};
uint8_t response[15];

// Variables para los datos del sensor Modbus
float humedadSuelo = 0;
float conductividad = 0;
float ph = 0;

// Variables LoRaWAN (igual que en el código original)
uint8_t devEui[] = {0x70, 0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x06, 0xCC, 0x0A};
uint8_t appEui[] = {0x1D, 0x81, 0xDF, 0x81, 0xF9, 0x81, 0x98, 0x1D};
uint8_t appKey[] = {0xBA, 0x08, 0x59, 0x84, 0x57, 0x3D, 0x30, 0x9C, 0x5F, 0xC0,
0xB6, 0xF7, 0xF4, 0x92, 0x39, 0x60};

/* ABP para*/
uint8_t nwkSKey[] = { 0x15, 0xb1, 0xd0, 0xef, 0xa4, 0x63, 0xdf, 0xbe, 0x3d, 0x11,
0x18, 0x1e, 0x1e, 0xc7, 0xda, 0x85 };
uint8_t appSKey[] = { 0xd7, 0x2c, 0x78, 0x75, 0x8c, 0xdc, 0xca, 0xbf, 0x55, 0xee,
0x4a, 0x77, 0x8d, 0x16, 0xef, 0x67 };
uint32_t devAddr = ( uint32_t )0x007e6ae1;

uint16_t userChannelsMask[6] = {0x00FF, 0x0000, 0x0000, 0x0000, 0x0000,
0x0000};
LoRaMacRegion_t loraWanRegion = ACTIVE_REGION;
DeviceClass_t loraWanClass = CLASS_A;
uint32_t appTxDutyCycle = 15000;
bool overTheAirActivation = true;
```

```
bool loraWanAdr = true;
bool isTxConfirmed = true;
uint8_t appPort = 2;
uint8_t confirmedNbTrials = 4;

// Leer datos del sensor Modbus
void readModbusSensors() {
  RS485.write(modbusRequest, sizeof(modbusRequest));
  RS485.flush();
  delay(200);

  int len = RS485.available();
  if (len >= 11) {
    RS485.readBytes(response, len);

    uint16_t humedadRaw = (response[3] << 8) | response[4];
    uint16_t conductividadRaw = (response[7] << 8) | response[8];
    uint16_t phRaw = (response[9] << 8) | response[10];

    humedadSuelo = humedadRaw / 10.0;          // Humedad en %
    conductividad = conductividadRaw;          // Conductividad en µS/cm
    ph = phRaw / 10.0;                         // pH
  } else {
    humedadSuelo = 0;
    conductividad = 0;
    ph = 0;
  }
}

// Preparar la trama para transmisión LoRaWAN
static void prepareTxFrame(uint8_t port) {
  sensors_event_t event;
  dht.temperature().getEvent(&event);
  float temperaturaAmbiente = isnan(event.temperature) ? 0 : event.temperature;

  dht.humidity().getEvent(&event);
     float humedadAmbiente = isnan(event.relative_humidity) ? 0 :
event.relative_humidity;

  // Leer los datos del sensor Modbus
  readModbusSensors();

  // Empaquetar los datos en appData
  appDataSize = 7; // 7 bytes
  appData[0] = (uint8_t)humedadSuelo;
  appData[1] = (uint8_t)(ph * 10); // pH multiplicado por 10
  appData[2] = (conductividad >> 8) & 0xFF;
  appData[3] = conductividad & 0xFF;
  appData[4] = (uint8_t)humedadAmbiente;
```

```
  appData[5] = (int8_t)temperaturaAmbiente + 40;

  // Mostrar los valores en consola
  Serial.print("Humedad Suelo: ");
  Serial.print(humedadSuelo);
  Serial.print("%, pH: ");
  Serial.print(ph);
  Serial.print(", Conductividad: ");
  Serial.print(conductividad);
  Serial.print(" µS/cm, Humedad Ambiente: ");
  Serial.print(humedadAmbiente);
  Serial.print("%, Temperatura Ambiente: ");
  Serial.print(temperaturaAmbiente);
  Serial.println(" °C");
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Mcu.begin(HELTEC_BOARD, SLOW_CLK_TPYE);
  dht.begin();
          RS485.begin(4800,          SERIAL_8N1,          SIMULATED_UART_RX,
SIMULATED_UART_TX);
}

void loop() {
  switch (deviceState) {
    case DEVICE_STATE_INIT:
      LoRaWAN.init(loraWanClass, loraWanRegion);
      LoRaWAN.setDefaultDR(3);
      break;
    case DEVICE_STATE_JOIN:
      LoRaWAN.join();
      break;
    case DEVICE_STATE_SEND:
      prepareTxFrame(appPort);
      LoRaWAN.send();
      deviceState = DEVICE_STATE_CYCLE;
      break;
    case DEVICE_STATE_CYCLE:
       txDutyCycleTime = appTxDutyCycle + randr(-APP_TX_DUTYCYCLE_RND,
APP_TX_DUTYCYCLE_RND);
      LoRaWAN.cycle(txDutyCycleTime);
      deviceState = DEVICE_STATE_SLEEP;
      break;
    case DEVICE_STATE_SLEEP:
      LoRaWAN.sleep(loraWanClass);
      break;
    default:
      deviceState = DEVICE_STATE_INIT;
```

```
    break;
  }
}
```

Anexo G. Código del nodo actuador

```
#include "LoRaWan_APP.h"

/* OTAA para*/
uint8_t devEui[] = { 0x70, 0xB3, 0xD5, 0x7E, 0xD0, 0x06, 0xD7, 0xB0 };
uint8_t appEui[] = { 0x23, 0x45, 0x67, 0x8B, 0xC6, 0x7B, 0x89, 0xEF };
uint8_t appKey[] = { 0xEA, 0xEF, 0xC5, 0x63, 0xED, 0xFA, 0xEF, 0x21, 0x6A,
0xC6, 0xA2, 0x5A, 0xE9, 0x62, 0x68, 0x88 };

/* ABP para*/
uint8_t nwkSKey[] = { 0x15, 0xb1, 0xd0, 0xef, 0xa4, 0x63, 0xdf, 0xbe, 0x3d, 0x11,
0x18, 0x1e, 0x1e, 0xc7, 0xda,0x85 };
uint8_t appSKey[] = { 0xd7, 0x2c, 0x78, 0x75, 0x8c, 0xdc, 0xca, 0xbf, 0x55, 0xee,
0x4a, 0x77, 0x8d, 0x16, 0xef,0x67 };
uint32_t devAddr =  ( uint32_t )0x007e6ae1;

/*LoraWan channelsmask, default channels 0-7*/
uint16_t userChannelsMask[6]={ 0x00FF,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000 };

/*LoraWan region, select in arduino IDE tools*/
LoRaMacRegion_t loraWanRegion = ACTIVE_REGION;

/*LoraWan Class, Class A and Class C are supported*/
DeviceClass_t  loraWanClass = CLASS_C;

/*the application data transmission duty cycle.  value in [ms].*/
uint32_t appTxDutyCycle = 15000;

/*OTAA or ABP*/
bool overTheAirActivation = true;
```

```
/*ADR enable*/
bool loraWanAdr = true;

/* Indicates if the node is sending confirmed or unconfirmed messages */
bool isTxConfirmed = true;
bool isRxConfirmed = true;



/* Application port */
uint8_t appPort = 4;

uint8_t confirmedNbTrials = 4;

#define VENTILADOR_PIN 38
#define ELECTROVALVULA1_PIN 39
#define ELECTROVALVULA2_PIN 40
#define SELECTOR_MODE_PIN 20 //41
#define MANUAL_VENTILADOR_PIN 42
#define MANUAL_ELECTROVALVULA1_PIN 45
#define MANUAL_ELECTROVALVULA2_PIN 46
#define INDICADOR_MANUAL_PIN 48
#define INDICADOR_AUTO_PIN 47

bool estadoVentilador = false;
bool estadoElectrovalvula1 = false;
bool estadoElectrovalvula2 = false;
bool modoAutomatico = true;  // true = automático, false = manual

/* Prepares the payload of the frame */
static void prepareTxFrame( uint8_t port )
{
   appDataSize = 4;
```

```
  appData[0] = estadoVentilador ? 0x01 : 0x00;  // Estado del ventilador (1 byte)
  appData[1] = estadoElectrovalvula1 ? 0x01 : 0x00;  // Estado de la electroválvula (1 byte)
  appData[2] = estadoElectrovalvula2 ? 0x01 : 0x00;  // Estado de la electroválvula 2 (1 byte)
  appData[3] = modoAutomatico ? 0x01 : 0x00;  // Modo de control (1 = automático, 0 = manual)
   Serial.printf("Ventilador: %d, Electrovalvula1: %d, Electrovalvula2: %d, Modo: %s\n", appData[0], appData[1], appData[2], modoAutomatico ? "Automático" : "Manual");
}

//downlink data handle function example
void downLinkDataHandle(McpsIndication_t *mcpsIndication)
{
   Serial.printf("+REV DATA:%s,RXSIZE %d,PORT %d\r\n",mcpsIndication->RxSlot?"RXWIN2":"RXWIN1",mcpsIndication->BufferSize,mcpsIndication->Port);
 Serial.print("+REV DATA:");
 for(uint8_t i=0;i<mcpsIndication->BufferSize;i++)
 {
  Serial.printf("%02X",mcpsIndication->Buffer[i]);
  // Reinicia el buffer
  // memset(mcpsIndication->Buffer, 0, mcpsIndication->BufferSize);
 }
 Serial.println();

 // Procesar mensaje downlink para controlar actuadores
  if (mcpsIndication->BufferSize >= 0) {
       // Controlar estado del ventilador
     if (mcpsIndication->Buffer[0] == 0x01) {
        encenderVentilador();
     } else if (mcpsIndication->Buffer[0] == 0x00) {
```

```
            apagarVentilador();
        }
        // Controlar estado de la primera electroválvula
        if (mcpsIndication->Buffer[1] == 0x01) {
            encenderElectrovalvula1();
        } else if (mcpsIndication->Buffer[1] == 0x00) {
            apagarElectrovalvula1();
        }
        // Controlar estado de la segunda electroválvula
        if (mcpsIndication->Buffer[2] == 0x01) {
            encenderElectrovalvula2();
        } else if (mcpsIndication->Buffer[2] == 0x00) {
            apagarElectrovalvula2();
        }
        // Reinicia el buffer
        memset(mcpsIndication->Buffer, 0, mcpsIndication->BufferSize);
    }

            /*uint32_t        color=mcpsIndication->Buffer[0]<<16|mcpsIndication-
>Buffer[1]<<8|mcpsIndication->Buffer[2];
  #if(LoraWan_RGB==1)
    turnOnRGB(color,5000);
    turnOffRGB();
  #endif*/
}

void actualizarIndicadores() {
    if (modoAutomatico) {
        digitalWrite(INDICADOR_AUTO_PIN, HIGH); // Enciende indicador de
automático
        digitalWrite(INDICADOR_MANUAL_PIN, LOW); // Apaga indicador de
manual
    } else {
```

```
        digitalWrite(INDICADOR_AUTO_PIN, LOW); // Apaga indicador de automático
      digitalWrite(INDICADOR_MANUAL_PIN, HIGH); // Enciende indicador de manual
   }
}

void encenderVentilador() {
 digitalWrite(VENTILADOR_PIN, HIGH);
 estadoVentilador = true;
 Serial.println("Ventilador ENCENDIDO");
}

void apagarVentilador() {
 digitalWrite(VENTILADOR_PIN, LOW);
 estadoVentilador = false;
 Serial.println("Ventilador APAGADO");
}

void encenderElectrovalvula1() {
 digitalWrite(ELECTROVALVULA1_PIN, HIGH);
 estadoElectrovalvula1 = true;
 Serial.println("Electroválvula 1 ENCENDIDA");
}

void apagarElectrovalvula1() {
 digitalWrite(ELECTROVALVULA1_PIN, LOW);
 estadoElectrovalvula1 = false;
 Serial.println("Electroválvula 1 APAGADA");
}

void encenderElectrovalvula2() {
   digitalWrite(ELECTROVALVULA2_PIN, HIGH);
```

```
    estadoElectrovalvula2 = true;
    Serial.println("Electroválvula 2 ENCENDIDA");
}

void apagarElectrovalvula2() {
    digitalWrite(ELECTROVALVULA2_PIN, LOW);
    estadoElectrovalvula2 = false;
    Serial.println("Electroválvula 2 APAGADA");
}

void controlManual() {
    if (digitalRead(MANUAL_VENTILADOR_PIN) == HIGH) encenderVentilador();
    else apagarVentilador();

        if (digitalRead(MANUAL_ELECTROVALVULA1_PIN) == HIGH)
encenderElectrovalvula1();
    else apagarElectrovalvula1();

        if (digitalRead(MANUAL_ELECTROVALVULA2_PIN) == HIGH)
encenderElectrovalvula2();
    else apagarElectrovalvula2();
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(VENTILADOR_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ELECTROVALVULA1_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ELECTROVALVULA2_PIN, OUTPUT);
  pinMode(SELECTOR_MODE_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(MANUAL_VENTILADOR_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(MANUAL_ELECTROVALVULA1_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(MANUAL_ELECTROVALVULA2_PIN, INPUT_PULLUP);
  pinMode(INDICADOR_MANUAL_PIN, OUTPUT);
```

```
  pinMode(INDICADOR_AUTO_PIN, OUTPUT);

  digitalWrite(INDICADOR_MANUAL_PIN, LOW);
  digitalWrite(INDICADOR_AUTO_PIN, LOW);

  Mcu.begin(HELTEC_BOARD,SLOW_CLK_TPYE);
}

void loop()
{
    static bool lastModoAutomatico = true; // Estado anterior del modo
    modoAutomatico = digitalRead(SELECTOR_MODE_PIN) == HIGH;
        // Detectar cambio de modo
    // Detectar cambio de modo

    if (modoAutomatico && !lastModoAutomatico) {
        Serial.println("Cambiando de modo manual a automático...");
        // Procesar actuadores al cambiar a automático
        apagarVentilador();
        apagarElectrovalvula1();
        apagarElectrovalvula2();
        // Los actuadores se configurarán con el próximo mensaje downlink
    }

    lastModoAutomatico = modoAutomatico;

// Determinar el modo actual (manual o automático)
    //modoAutomatico = digitalRead(SELECTOR_MODE_PIN) == HIGH;

    // Asegurarse de que LoRaWAN esté inicializado siempre
    static bool loraInitialized = false;
    if (!loraInitialized) {
        Serial.println("Inicializando LoRaWAN...");
```

```
    LoRaWAN.init(loraWanClass, loraWanRegion);
    LoRaWAN.setDefaultDR(3);
    loraInitialized = true;
  }

  // Actualizar indicadores según el modo
  actualizarIndicadores();

  // Control de actuadores basado en el modo
  if (modoAutomatico) {
    // Operación automática (responder a mensajes downlink)
    switch (deviceState) {
      case DEVICE_STATE_JOIN:
        LoRaWAN.join();
        break;
      case DEVICE_STATE_SEND:
        prepareTxFrame(appPort); // Preparar los datos
        Serial.println("Enviando datos en modo automático...");
        LoRaWAN.send(); // Enviar los datos
        deviceState = DEVICE_STATE_CYCLE;
        break;
      case DEVICE_STATE_CYCLE:
                              txDutyCycleTime = appTxDutyCycle + randr(-
APP_TX_DUTYCYCLE_RND, APP_TX_DUTYCYCLE_RND);
        LoRaWAN.cycle(txDutyCycleTime);
        deviceState = DEVICE_STATE_SLEEP;
        break;
      case DEVICE_STATE_SLEEP:
        LoRaWAN.sleep(loraWanClass);
        break;
      default:
        deviceState = DEVICE_STATE_JOIN;
        break;
```

```
    }
  } else {
    // Operación manual (control por botones)
    controlManual();

    switch (deviceState) {
      case DEVICE_STATE_JOIN:
        LoRaWAN.join();
        break;
      case DEVICE_STATE_SEND:
        prepareTxFrame(appPort); // Preparar los datos
        Serial.println("Enviando datos en modo automático...");
        LoRaWAN.send(); // Enviar los datos
        deviceState = DEVICE_STATE_CYCLE;
        break;
      case DEVICE_STATE_CYCLE:
                              txDutyCycleTime = appTxDutyCycle + randr(-
APP_TX_DUTYCYCLE_RND, APP_TX_DUTYCYCLE_RND);
        LoRaWAN.cycle(txDutyCycleTime);
        deviceState = DEVICE_STATE_SLEEP;
        break;
      case DEVICE_STATE_SLEEP:
        LoRaWAN.sleep(loraWanClass);
        break;
      default:
        deviceState = DEVICE_STATE_JOIN;
        break;
    }
  }

}
```